



Vícevrstvé struktury chránící před infračerveným laserovým zářením

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství

Studijní obor: 3911T023 – Řízení jakosti

Autor práce: **Bc. Dorzhi Munkuev**

Vedoucí práce: Ing. Marie Kašparová



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Dorzhi Munkuev**

Osobní číslo: **T14000080**

Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Název tématu: **Vícevrstvé struktury chránící před infračerveným laserovým zářením**

Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte rešerši na téma metody ochrany před infračerveným laserovým zářením
2. Navrhněte a proveďte experimenty na hodnocení ochrany lidského těla před laserovým zářením
3. Otestujte chování jednovrstvých a vícevrstvých textilních struktur
4. Diskutujte možnosti využití ochranných textilních struktur při průmyslovém využívání laserů

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] Dohnal, M.: **Lasery a jejich aplikace v polygrafii**, skriptum Univerzity Pardubice, 2008, ISBN 978-80-7395-043-9

[2] Vrbová, M.-Jelínková, H.-Gavrilov, P.: **Úvod do laserové techniky**, 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marie Kašparová

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant diplomové práce:

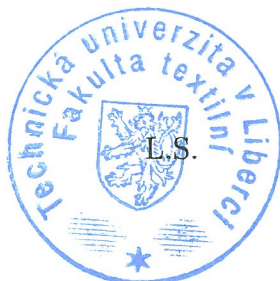
prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **27. března 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 09.05.2016

Podpis: 

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí práce Ing. Marii Kašparové a konzultantovi práce prof. Ing. Jakubovi Wienerovi, Ph.D za jejich odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce. Dále Ing. Janě Grábmüllerové za pomoc při analýze povrchu čedičové vrstvy. Nemohu opomenout poděkovat prof. Ing. Lubošovi Hesovi, DrSc za pomoc a konzultace při studiu přenosových jevů v textiliích a doc. Ing. Marošovi Tunákovi, Ph.D za konzultace ve zpracování dat. Také bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě podporovala v průběhu mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Úvod.....	10
1 Teplo	11
1.2 Přenos tepla.....	11
2 Tepelná izolace	12
2.1 Použití izolačních materiálů.....	12
2.2 Izolace přenosu tepla vedením.....	13
2.3 Izolace přenosu tepla prouděním	13
2.4 Izolace přenosu tepla zářením.....	14
2.2 Textilní izolační materiály	14
3 „LASER“	17
3.1 Stimulovaná emise záření	17
3.2 Vlastností a kvalita laserového paprsku.....	18
3.3 Konstrukce laseru.....	19
3.4 Klasifikace laseru.....	21
3.5 Aplikace laserové technologie	22
3.5.1 Průmyslová aplikace laseru.....	22
3.5.2 Lasery ve vojenském průmyslu. Laserové zbraně	24
3.6 Bezpečnost laseru.....	25
3.6.1 Třídy bezpečnosti laseru	26
3.7 Metody ochrany proti laserovému záření	27
3.7.1 Ochranný oděv proti laserovému záření	28
4 Možnosti návrhu vícevrstvé struktury	29
4.1 Vícevrstvá struktura s využitím vzduchové izolační bariéry.....	29
4.2 Použití gelového materiálu ve vícevrstvé struktuře	30
4.3 Ochranná struktura ve vojenském průmyslu.....	31
5 Návrh experimentu.....	33
5.1 Nultý experiment. Zkoušení základních materiálů	36
5.2 Experiment 1. Vícevrstvá struktura s využitím vzduchové izolační bariéry	38
5.3 Experiment 2. Gelová vrstva.....	44
5.4 Experiment 3. Explosivní model s vytvořením "mlhové zábrany".	48
5.5 Rekapitulace experimentů.....	57

Závěr	60
Literatura:.....	61
Seznam obrázků.....	62
Seznam tabulek	63
Seznam příloh	64
Příloha 1 Analýza povrchu čedičové vrstvy po ozáření laserem	65
Příloha 2 Grafy průběhu teploty	68

Seznam použitých zkratek

E	energetická hladina
h	Planckova konstanta
ν	frekvence záření
R	tepelný odpor
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
PET	polyethylen
PC	počítač
m^2	metr čtvereční
cm	centimetr
mm	milimetr
g	gram
kg	kilogram
T[°C]	teplota ve stupních celsia
K	teplota v kelvinech
W	watt
J	joule
CMC bavlna	bavlna modifikovaná karobymethylcelulózou
var.koef	variační koeficient
sm.odch	směrodatná odchylka
95 % IS	interval spolehlivosti

ANOTACE

Práce je zaměřená na studium metod ochrany lidského těla před účinkem záření vysoce výkonných laserů pomocí vícevrstvých struktur. Nejdříve byla zvolena základní struktura a dále byly navrženy tři metody ochrany - "vzduchová bariéra", gelová vrstva, aktivní ochrana. V experimentální části byl zkoušen vliv metod a jejich parametrů. Také byla snaha o optimalizaci a kombinaci jednotlivých metod. Všechny metody prokázaly svou účinnost za podmínek navrženého experimentu a v kombinaci vybraných metod je účinnost ochrany efektivnější. Na závěr byla provedena diskuze o výsledcích experimentu a možnost uplatnění metod v praxi.

Klíčová slova: ochrana lidského těla, vysoce výkonné lasery, vícevrstvé struktury, metody ochrany, "vzduchová bariéra", gelová vrstva, aktivní ochrana.

ABSTRAKT

The work is focused on the study of methods of protecting the human body against the effects of radiation by high power lasers while using multilayer structures. At first the basic structure has been chosen and have proposed three methods of protection - "air barrier", gel layer, active protection. The experimental part was examined the influence of methods and their parameters. There was also an effort of optimization and combine of individual methods. All methods have proven their effectiveness under conditions of proposed experiment and combination of selected methods is most efficient protection. At the end there was a discussion about the results of the experiment and the possibility of the application of methods in practice.

Key words: protection of human body, high power lasers, multilayer structures, methods of protection, "air barrier", gel layer, active protection.

Úvod

V současné době má použití laserové technologie široké uplatnění v různých odvětvích lidské činnosti. Laser se spojuje především s přesností a tato jeho vlastnost je hodně využívána. Běžné používání laserových ukazovátek je široce známo, ale to, že rozvoj laserových technologií dnes umožňuje řešit i složitější úlohy v průmyslové praxi, není zatím populární. Lasery uplatněné v průmyslu jsou vysoce výkonné a nesou určité nebezpečí. Proto se využívají jako automatizované laserové systémy, ale pořád je zapotřebí operátor při zpracování některých úloh. Operátoři laserových zařízení potřebují ochranné pomůcky, jako brýle, ochranný pracovní oděv.

Tato práce se bude věnovat studiu ochrany člověka proti účinku záření vysoce výkonných laserů. Bylo provedeno studium podstaty laserového záření, jaké faktory ho ovlivňují a metody ochrany. Podstatnou částí ochrany je tepelná izolace, o které také bude proveden výzkum. Na základě těchto studií byly navrženy textilní vícevrstvé struktury chránící před účinkem laserového záření. Jedna z těchto struktur byla navržena pro specifickou oblast použití, kterou je vojenský průmysl. V současnosti jsou již prezentovány první funkční laserové zbraně, které úspěšně prokázaly svou účinnost.

V experimentální části budou navrženy struktury, při jejichž zkouškách se budou sledovat parametry, které ovlivňují účinnost ochrany. Bude provedena analýza výsledků pomocí statistických metod. V souhrnu by se měly projevit hlavní faktory, které se musí zohlednit a optimalizovat. Následně bude provedena diskuze o možnosti uplatnění těchto struktur v praxi.

1 Teplo

Teplo je energie vyměněná mezi systémem a okolím, jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi. Uvažujeme o situaci, při které máme systém s teplotou T_s a okolí tohoto systému s teplotou T_0 . Když T_s není rovno T_0 , pak T_s se mění, při tom se může měnit i teplota okolí. Změna trvá, dokud nebude dosažena rovnováha mezi teplotou systému a okolí. Taková změna teploty je způsobena speciálním přenosem energie mezi systémem a jeho okolím. Mění se přitom vnitřní energie, což je souhrn potenciální a kinetické energie spojené s náhodným pohybem atomů, molekul a jiných mikroskopických částí zkoumaného předmětu. Energie takto přenesená se nazývá teplo a značí se Q . Teplo bereme jako kladné, je-li dodáno do systému z okolí (někdy říkáme, že bylo teplo systémem pohlceno). Teplo je záporné, jestliže přešlo ze systému do jeho okolí (říkáme, že bylo teplo uvolněno, předáno, příp. vyzařeno). Nechceme-li určit směr přenosu energie, mluvíme o teple vyměněném s okolím.[1]

1.2 Přenos tepla

Jsou tři mechanismy přenosu tepla: vedení, proudění a záření.

Vedení

Pokud na kovové těleso působí vysoká teplota na jednom konci, pak efekt odezní i na druhém konci. V tomto případě hovoříme, že energie se přenáší vedením podél celého tělesa. Amplitudy kmitů atomů a elektronů tvořících kov, výrazně vzrostou pod působením vysoké teploty, díky vysoké teplotě okolí. Nárůst amplitudy kmitání a s tím spojená energie se šíří podél kovového tělesa od atomu k atomu prostřednictvím srážek sousedních atomů. Touto cestou se oblast zvýšené teploty rozšiřuje po tělesu od jednoho konce k druhému.[1]

Proudění

Jedná se o proudění hmoty o různé teplotě. Takový přenos tepla se uplatňuje pouze u kapalin a plynu. K proudění dochází, pokud teplotní rozdíl způsobí přenos tepla pohybem tekutiny. [1]

Záření

Třetí způsob přenosu tepla mezi předmětem a jeho okolím je přenos tepla zářením, někdy též sáláním, prostřednictvím elektromagnetických vln. Viditelné světlo je rovněž jistý druh elektromagnetických vln. V takovém případě často mluvíme o tepelném záření, abychom ho odlišili od elektromagnetických signálů (jako např. televizní vysílání) nebo od radioaktivního

záření (energie a částice vyzařované atomovými jádry). Pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí. [1]

2 Tepelná izolace

Tepelná izolace je způsob zabránění přenosu tepelné energie z jedné oblasti do druhé. Tedy teplo izolace může buď, zachovat teplo uvnitř nebo zabránit proniknutí tepla do uzavřeného systému. Z předchozích kapitol známe 3 způsoby přenosu tepla: vedení (kondukce), proudění (konvekce), záření (sálání). Tepelné izolanty jsou určeny pro minimalizaci přenosu tepelné energie. Tyto izolanty pak mají R-hodnotu, jako identifikaci izolační vlastnosti, která udává, jak dobře se minimalizuje přenos tepelné energie. [2]

Kde se tepelná izolace používá

Zpravidla, když máme objekt nebo oblast při určité teplotě, tak je zapotřebí, aby se zabránilo tomu, že teploty objektu a okolí se budou vyrovnávat. To se obvykle provádí tak, že se udělá tepelně izolační bariéra.

V každém místě, kde se potkávají materiály dvou radikálně různých teplot, je zapotřebí poskytnout izolační bariéru, aby se zabránilo vyrovnání teplot obou materiálů. V takových situacích je snahou minimalizovat přenos tepla z jedné oblasti do druhé.[2]

Jak izolace funguje

Izolace funguje tak, že se vytvoří izolační bariéra, která minimalizuje přenos tepelné energie z jednoho materiálu do druhého, snížením vodivosti, proudění a záření za pomoci různých druhů materiálů a struktur.

2.1 Použití izolačních materiálů

Nejdřív se seznámíme s materiály, které umožňují tepelnou izolaci. Většinou se izolace používá k zabránění vedení tepla. V některých případech může být záření jako faktor. Dobrým izolátorem je samozřejmě materiál, který má špatnou vodivost (kondukci).

Materiály s nízkou hustotou jsou lepšími izolátory. Čím vyšší hustota materiálu, tím blíže se nacházejí jeho atomy vůči sobě. To znamená, že přenos tepelné energie z jednoho atomu k druhému je účinnější. Proto plyny izolují lépe než tekutiny a pevné látky. Zajímavým faktem je, že špatné vodiče elektřiny jsou také špatnými vodiči tepla. Například dřevo je mnohem lepší izolant než měď. Důvodem je, že kovy, které dobře vedou elektřinu, umožňují volným elektronům pohybovat se přes materiál. To zvyšuje přenos energie z jedné oblasti do druhé v kovu. Naopak dřevo nemá takovou vlastnost, proto je špatným vodičem tepla. [2]

2.2 Izolace přenosu tepla vedením

Přenos tepelné energie vedením nastává zpravidla u pevných látek, když jsou v přímém vzájemném kontaktu. Atomy a molekuly s vysokou kinetickou energií narážejí na své sousední částice a tím zvyšují i jejich energii. Toto zvýšení energie může probíhat uvnitř látky nebo mezi samostatnými látkami. V praxi se setkáváme s kombinací různých materiálů.[2]

Styk dvou pevných těles

Pro zpomalení přenosu tepla vedením z jednoho pevného materiálu k jinému, se mezi ně vloží materiál, který je špatným vodičem. Příklady:

- Skelná vlákna nejsou dobrými vodiči. To je důvod, proč skelná vata je často používána jako izolace mezi vnější a vnitřní stěnou domu.
- Vedení tepla nemůže procházet ve vakuu. To je důvod, proč termoska má vakuovou mezeru mezi stěnami. Pak se nemůže vedené teplo dostat z jedné vrstvy na druhou.

Styk plynu a pevného tělesa

Pro zpomalení vedení tepla mezi vzduchem a pevným tělesem se mezi ně vloží materiál se špatnou vodivostí tepla. Pokud je studený nebo horký vzduch v kontaktu s pokožkou, pak to snižuje nebo zvyšuje její teplotu. Oděv nebo srst zvířat jsou příkladem takové izolace. Oděv právě slouží, jako izolační vrstva a brání úniku tělesného tepla do studeného vzduchu. [2]

Styk tekutiny a pevného tělesa

Stejně to funguje i v tomto případě. Například, pro plavání v studené vodě plavci oblékají speciální termoprádlo.

2.3 Izolace přenosu tepla prouděním

Proudění je přenos tepla, který nastává, když je tekutina v pohybu. Vzhledem k tomu, vzduch a voda nevedou snadno teplo, často přenášejí teplo prostřednictvím jejich pohybu. Pec poháněná ventilátorem je příkladem takového přenosu. Izolace přenosu tepla prouděním se obvykle provádí tak, že se zabrání pohybu tekutiny nebo se zajišťuje prevence proudění.

Nošení protivětrného oděvu v chladném a větrném dni, bude snižovat ztrátu tepla při proudění chladného vzduchu. [2]

2.4 Izolace přenosu tepla zářením

Horké a dokonce i teplé objekty vyzařují infračervené elektromagnetické vlny, které mohou zahřát objekty na dálku a stejně tak ztrácejí sami energii. Izolace proti přenosu tepla zářením se obvykle provádí pomocí reflexních materiálů. Například termoska má nejen vakuové obložení, aby se zabránilo přenosu tepla vedením, ale také je vyrobena z lesklého materiálu, aby se zabránilo přenosu tepla zářením. Záření z teplé potravin uvnitř termosky se odráží zpět k sobě. Záření z teplého vnějšího materiálu, se odráží, aby se zabránilo ohřevu chladné tekutiny uvnitř láhve. Dalším zjevným příkladem jsou protisluneční clony do auta, které zabraňují ohřátí vnitřku vozidla.[2]

R-hodnota

R-hodnota materiálu je jeho tepelný odpor nebo odolnost proti přenosu tepla a svědčí o jeho schopnosti izolovat. Používá se, jako standardní způsob, který udává, jak dobře materiál bude izolovat. Čím vyšší je hodnota R, tím lepší je izolace.[2]

Definice

R-hodnota je převrácená hodnota množství tepelné energie na plochu materiálu proti rozdílu teplot mezi vnějškem a vnitřkem. R-hodnota je definovaná takto:

$$R[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] = \frac{plocha[m^2] \times teplota (C^\circ)}{P[W]} = \frac{h(tloušťka)[m]}{\lambda(tepelná\ vodivost)[W/(m \cdot K)]} \quad (1)$$

R-hodnota je úměrná tloušťce materiálu. Například, pokud tloušťka se zdvojnásobí, pak R-hodnota se také zdvojnásobí. Pokud tepelná vodivost je malá pak R hodnota je vysoká.[2]

2.2 Textilní izolační materiály

Mezi izolačními materiály najdeme různé druhy od vláknitých materiálů, jako je skleněné vlákno, kamenná a strusková vlna, celulóza a přírodní vlákna, až po tuhé pěnové desky a reflexní fólie. Vláknité materiály dobře odolávají vedenému teplu a v menší míře proudícímu toku tepla. Pěnové desky obsahují vzduch nebo plyn a dobře odolávají vedenému toku tepla. Vysoce reflexní fólie a reflexní zateplovací systémy odrážejí sálavé teplo a tím chrání obytný prostor, což je obzvláště užitečné při klimatizaci. Jiné méně běžné materiály, jako je fenolová pěna, slouží také k účelu izolace.[3]

Izolace ze skelných vláken

Izolační útvary jsou tvořeny velmi jemnými skelnými vlákny a jsou jedním z nejrozšířenějších izolačních materiálů. Tyto útvary jsou běžně používány ve dvou různých typech izolace: plošné a volně sypané. Útvary mohou být ve formě pevných desek.[3]

Materiály z minerální vlny

Pojem "minerální vlna" obvykle se odkazuje na dva typy izolačního materiálu:

- Kamenná vlna, umělá hmota se skládá z přírodních minerálů, jako je čedič nebo diabas.
- Strusková vlna, syntetický materiál z vysokopecní strusky.

Minerální vata je složena ze 75% z recyklované složky. To nevyžaduje žádné dodatečné chemikálie, aby se zajistila žáruvzdornost. Běžně jsou dostupné, jako vata nebo volně sypaná izolace.[3]

Izolační materiál z celulózy

Celulózový izolační materiál se vyrábí z recyklovaného papíru, především novinový, a má velmi vysoký obsah recyklované složky 82-85%. Papír se nejprve redukuje na malé kousky a potom se provede zvlákňování. To se obvykle používá pro zateplení budov. Taková izolace poskytuje R-hodnotu 3.6-3.8 na palec. [3]

Izolační materiál ze syntetických vláken

Syntetický izolační vláknitý materiál je primárně vyroben z recyklovaných plastových lahví (z polyethylentereftalátových nebo PET). Vláknina jsou formovány na podobu skelné vaty. Takováto izolace je nehořlavá, zpravidla se taví při působení vysoké teploty. R-hodnota syntetické izolace je závislá na hustotě, R-3,8/2,54cm na 0.13kg/m³ až R-4,3/2,54 na 0.41/m³. Syntetická izolace není náročná při zpracování, ale při řezání je obtížné standardními nástroji. [3]

Izolace přírodními vlákny

Některé z přírodních vláken - bavlna, ovčí vlna, konopí se používají, jako izolační materiály.

Izolace z bavlny

Bavlněná izolace je složena 85% z recyklované bavlny a 15% ze syntetické hmoty, které byly ošetřeny boritany. V důsledku jejího recyklovaného obsahu má tento produkt minimální spotřebu energií na výrobu. Bavlněná izolace je k dispozici ve formě rouna s hodnotou R-3,4 na palec. Tato izolace je také netoxická a může se nainstalovat bez použití respirátoru a kožní ochrany. Nicméně, bavlněná izolace je dražší řádově o 15% až 20% než izolace ze skelných vláken.[3]

Izolace z vlny

Pro použití v izolaci je ovčí vlna také ošetřena boritany, aby se zajistila odolnost proti škůdcům, ohni a plísním. Tato izolace může obsahovat velké množství vody, což je výhodné pro použití v některých stěnách, ale opakované smáčení a sušení může vylučovat boritan. R-hodnota ovčí vlny je R-3,5 na palec, podobně jako u jiných vláknitých typů izolace.[3]

3 „LASER“

Slovo „LASER“ je ve své podstatě zkratkou anglického výrazu, popisujícího funkci tohoto objektu: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ – světlo zesílené stimulovanou emisí záření. Někdy se můžeme setkat s výrazem „kvantový generátor světla“, tento výraz je především rozšířen mezi vědci. Z těchto výrazů je zřejmé, že laser vydává světlo.

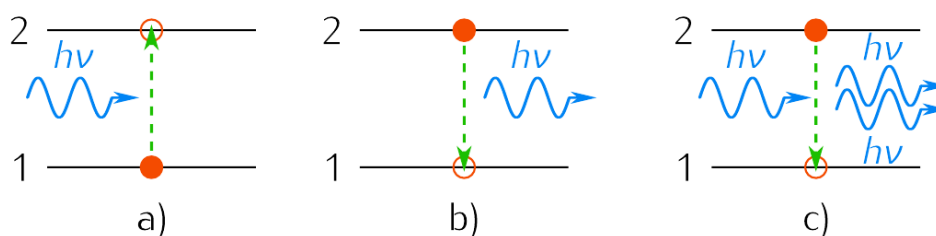
První funkční laser byl vynalezen v roce 1960 americkým fyzikem T.H.Maimanem. Jedná se o rubínový laser s vlnovou délkou 694,3 nm. Proti současným laserům nebyl dokonalý a dostatečně efektivní. Pracoval jen v pulsním režimu, protože využíval jen 3 energetické hladiny krystalu rubínu. V roce 1964 tento nedostatek odstranila skupina fyziků N.G. Basov, A.M. Prochorov a Ch.H. Townes použitím více energetických hladin, a tím bylo umožněno ustavení populační inverze, a tím i souvisle činnosti laseru.

Brzy se po této modifikaci začaly objevovat další typy laserů, které se lišily vlnovou délkou záření, konstrukcí, výkonem a účinností. Každý typ má svoje uplatnění podle podmínek a požadavku lidské činnosti. Neexistuje universální laser, který může být použit ve všech oblastech činností. [4]

V současné době se vyskytují lasery pokrývající širokou část spektra od mikrovlnné, přes infračervenou, viditelnou a ultrafialovou až po rentgenovou. Vlnová délka je v rozmezí od 100 mikrometrů až po jednotky nanometrů.

3.1 Stimulovaná emise záření

Základem laseru je aktivní prostředí. Jedná se o medium, ve kterém se zesiluje procházející záření díky stimulované emisi. Jde o jev, který nastává při interakci fotonu s atomem nebo molekulou. Obecně jsou možné 3 typy interakcí viz obr č.1.[4]



Obrázek č. 1 Typy interakcí fotonu s atomem nebo molekulou [4]

Uvažujeme dvě energetické hladiny 1 a 2 jednoho atomu daného materiálu s energiemi E_1 a E_2 , kde $E_1 < E_2$. Pro jednoduchost považujeme, že hladina 1 je základní, tj. kvantový stav

s minimální energií. Necht' atom na začátku leží na hladině 1. Atom má tendenci setrvávat na základní hladině, pokud mu není dodána energie, jinými slovy se musí stimulovat, aby přešel na vyšší hladinu. Stimulem ke změně jeho energetického stavu může být dopadající elektromagnetická vlna reprezentovaná fotony. Pokud energie těchto fotonů je rovna rozdílu E_2 a E_1 , atom absorbuje tuto energii a s konečnou pravděpodobností přejde na vyšší hladinu. Tento jev je nazýván absorpce záření obrázek č. 1a. [4]

Dále uvažujeme, že atom se již nachází na vyšší hladině. Protože $E_2 > E_1$, atom má tendenci přejít na energeticky výhodnější stav, tj. na hladinu nižší. Současně musí snížit svoji energii o rozdíl E_2 a E_1 . Pokud energie je vyzařena v podobě elektromagnetického záření, pak mluvíme o spontánní emisi obrázek č. 1b. Frekvence uvolněného vlnění ν je vyjádřen vztahem, kde h je Planckova konstanta:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2)$$

Spontánní emise je pak charakterizovaná vyzařením fotonu s energií:

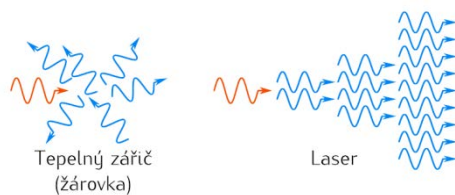
$$E_2 - E_1 = h \times \nu \quad (3)$$

Dalším případem je, když na atom nacházející se na vyšší hladině dopadá elektromagnetická vlna s frekvencí ν , pak existuje nenulová pravděpodobnost, že dopadající stimul donutí atom přejít na nižší hladinu za současnou emisi záření s energií $E_2 - E_1$. Dopadající a emitované vlnění se skládají a tím dochází k zesílení světla. Toto je třetí typ interakce nazývané stimulovaná emise obrázek č. 1c.

Nutným předpokladem nepřetržité stimulované emise je přítomnost inverzní populace, tj. částice nacházející se na vyšších hladinách musí být v přebytku, v opačném případě nastane absorpce emitovaného vlnění částicemi na nižších hladinách. [4]

3.2 Vlastností a kvalita laserového paprsku

Všechny stimulovaně emitované fotony mají stejnou vlnovou délku, a tím i energii. Laserové záření je proto monochromatické. Dále tyto fotony jsou navíc ve fázi a postupují stejným směrem, tedy záření je koherentní (uspořádané). Na rozdíl od záření běžného tepelného zdroje, laserové záření je fokusováno na velmi malý průměr a tím dosahuje vysoké hustoty výkonu obrázek č. 2. Fokusace je právě možná díky koherentnosti a nízké rozbíhavosti laserového svazku.



Obrázek č. 2 Porovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru

Kvalitu laserového svazku charakterizuje jeho schopnost být fokusován. Pro kruhově symetrické svazky ji charakterizuje veličina *Beam Parameter Product* *BBP* a vyjadřuje se vztahem:

$$BBP = w_0 \times \Theta \quad (4)$$

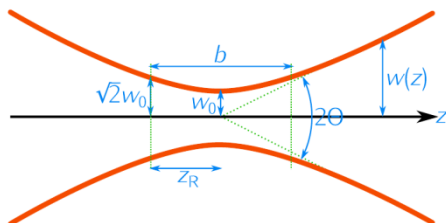
Kde w_0 je poloměr pasu svazku a Θ je polovina divergence (rozbíhavosti) svazku. Divergence svazku je úměrná vlnové délce λ a vyjadřuje se vztahem:

$$\Theta = M^2 \times \frac{\lambda}{\pi \times w_0} \quad (5)$$

Kde M^2 je faktor kvality svazku. Pro gaussovské svazky $M^2=1$, pro ostatní je $M^2>1$. Dále tento faktor vyjadřuje kvalitu svazku jako poměr *BPP* daného svazku a *BPP* gausovského svazku stejné vlnové délky.

$$M = \frac{BPP}{\frac{\lambda}{\pi}} = \frac{\pi}{\lambda} \times BPP, \text{ nebo } BPP = \frac{\lambda}{\pi} \times M^2 \quad (6)$$

Platí, čím je vyšší vlnová délka záření, tím je obtížnější fokusace, zvyšuje se *BPP* a tedy snižuje se kvalita.



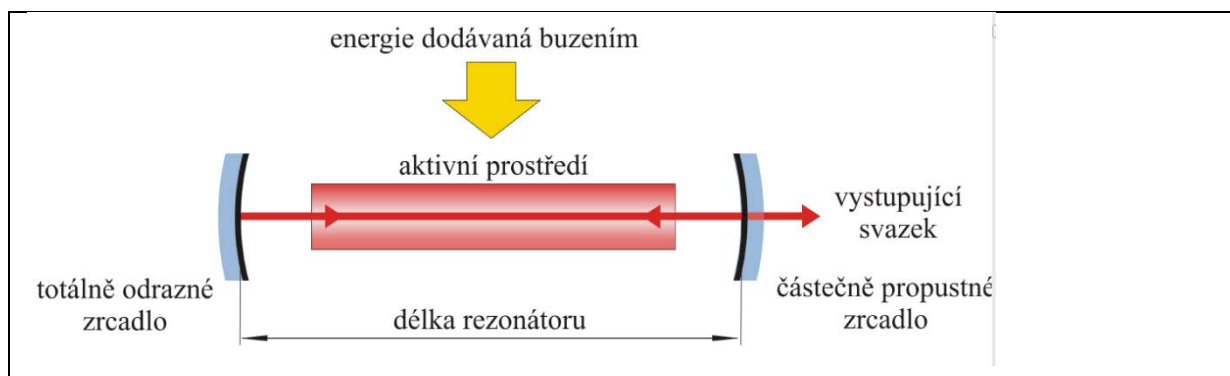
Obrázek č. 3 Schéma pasu svazku s vyznačením poloměru svazku w_0 , jeho divergence Θ a dalších parametrů. [4]

3.3 Konstrukce laseru

Mezi nezbytnými součástmi laseru jsou čerpací zařízení, optický rezonátor, vedení svazku, chlazení, manipulační zařízení, řídicí PC a již zmiňované aktivní prostředí.

Čerpací zařízení dodává energii aktivnímu prostředí a zajišťuje populační inverzi, která je nutným předpokladem pro stimulovanou emisi. Optický rezonátor zajišťuje dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním. Jedná se o dvě zrcadla, mezi kterými je

umístěno aktivní prostředí obrázek č.4. Záření vystupující z aktivního prostředí se odrazí od zrcadla a vrací se zpět, kde slouží jako podnět pro další stimulovanou emisi. Tento děj se opakuje a tím se zesiluje laserové záření. Jedno ze zrcadel je částečně propustné a po dosažení požadované intenzity, svazek opustí rezonátor tímto zrcadlem. [4]



Obrázek č. 4 Schéma optického rezonátoru [4]

U laserů používaných v průmyslu je svazek opouštějící rezonátor dále upravován systémem čoček a clon, čím se zvyšuje kvalita a upravuje se průměr výstupního svazku. Tento systém je nazýván expandér a slouží především ke snížení divergence svazku, ale pak dochází k velkým energetickým ztrátám. Výkonnost laseru se tím snižuje, ale v řadě aplikací v praxi se preferuje kvalita svazku před jeho výkonem. Filtrovaný svazek je dále expandérem veden do pracovní hlavy laseru (laserové hlavice), a jejím prostřednictvím k místu určení. Výběr materiálů, ze kterého jsou optické komponenty vyrobeny, závisí na vlnové délce generovaného záření a nesmí toto záření pohlcovat. Obvykle se používá dielektrické sklo nebo leštěné kovy. [4]

Kvůli velkým energetickým ztrátám při buzení aktivního prostředí, v rezonátoru a expandéru, kterými svazek prochází, dochází k významnému ohřevu některých součástí během činnosti laseru. V tomto případě laser může přestat fungovat a proto každý laserový systém musí být vybaven chladícím zařízením. Obvykle se používá chlazení založené na proudění kapaliny, nejčastěji demineralizované vody.

Ovládání a nastavení různých parametrů umožňuje řídicí počítač, který je často již zabudován do opláštění laserového systému. Obsahuje základní software pro ovládání a nastavení parametrů, ale pro složitější úlohy existuje možnost importu dat z 3D CAD programu. [4]

3.4 Klasifikace laseru

Lasery můžeme klasifikovat podle typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů. V tabulce č. 1 jsou uvedeny 3 základní možnosti klasifikace.

Tabulka č. 1 Klasifikace laseru

Podle typu aktivního prostředí:	
Plynové	atomární: He-Ne, He-Cd, Cu, I
	iontové: Ar, Kr
	molekulární: CO ₂ , N ₂ , H ₂
	excimerové: XeBr, KrO, ArO
Pevnolátkové	Nd: Yag, Nd: sklo, Er:Yag, Yb:Yag, Ti:safír, rubínový
Diodové	GaAs, GaN, PbSnSe, InAsSb
Kapalinové	na bázi organických barviv: coumarin, fluorescein, cyanin, rhodamin, oxazine
Podle vlnové délky:	
Infračervené: vlnové délky 780 nm – 1mm, emitující se ve viditelné oblasti 360 nm – 780 nm	
Ultrafialové: vlnová délka 10 nm – 360 nm	
Podle režimu práce:	
Kontinuální: nepřetržitá generace záření	
Pulsní: ns, ps, fs pulsy s vysokou opakovací frekvencí	
Impulsní: vysoce energetické pulsy s nízkou opakovací frekvencí	

3.5 Aplikace laserové technologie

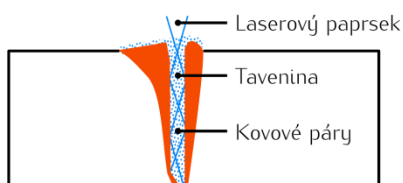
Lasery se uplatňují v nejrůznějších oblastech lidské činnosti. S lasery se můžeme potkat v domácnostech, kancelářích, jako součást elektroniky a různých zařízení. Dále laserová technologie je hodně využívána ve výzkumné činnosti a rozvíjí se uplatnění laseru v medicíně. V této práci se hlavně zaměříme na průmyslové využití laseru. Zejména záření těchto vysoce výkonných laserů nás bude zajímat při návrhu ochranných textilií. [4]

3.5.1 Průmyslová aplikace laseru

Již ve 20. století, po vynálezu prvního laseru, se začalo využívat interakce laserového záření s látkou. Postupem času se laser stal nástrojem v oblasti vrtání, řezání, svařování, povrchové úpravy a vyznačuje se vysokou přesností, možností automatizace a opakovatelností.

Laserové vrtání

První laserové vrtání bylo provedeno v roce 1965 pro přípravu otvoru v diamantových průvlacích pro tažení drátu. Po dopadu fokusovaného laserového záření se materiál v místě kontaktu ohřeje na teplotu varu a dojde k částečnému odpařování. Vytvoří se dutina a následně v ní dochází k mnohonásobným odrazům záření, což vede k náhlému vzrůstu absorpce a tím i prohloubení otvoru. [4]

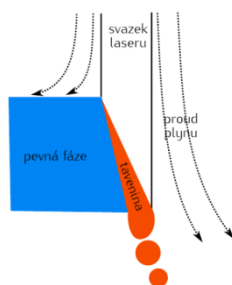


Obrázek č. 5 Laserové vrtání [4]

Pro vrtání se používají především pulsní lasery. Obvykle se využívá opakování řady pulsů v definovaných sériích. Vrtat se dají různé materiály: kov, plast, dřevo, sklo, keramika atd.

Laserové řezání

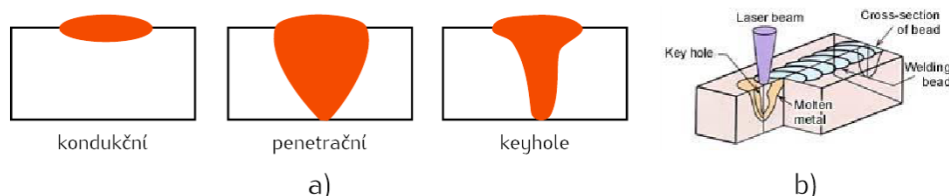
Laserové řezání, na rozdíl od konvenčních metod oddělování, má vyšší přesnost a výsledný objekt má hladký řez bez okují. Hrany jsou rovné a není potřebná další úprava. Hloubka řezu závisí na výkonu laseru a druhu materiálu. Například ocel o tloušťce 20 mm potřebujeme řezat laserem, který má výkon 5kW. Existuje řada technologií řezání laserem: odpařování, tavení, laserové orýsování, studené řezání a kontrolovaný lom, LASOX proces a další. V textilním průmyslu nachází laserové řezání také uplatnění v oddělovacím procesu. [4]



Obrázek č. 6 Laserové řezání [4]

Laserové svařování

Při působení laserového svazku může dojít k rychlému lokálnímu ohřevu, při tom se nestihnou uplatnit mechanismy vedení a sálání tepla. Ohřev, natavení, spojení a ochlazení svařovaného dílu probíhá velmi rychle. Díky tomu dostáváme úzkou tepelně ovlivněnou oblast v okolí svaru a tím i mnohem menší deformace svaru. Mezi přednosti laserového svařování patří vysoká rychlost, pevnost a také čistota svarů díky bezkontaktnímu přístupu nebo možnost svařovat materiály s různými teplotami tavení. V závislosti na výkonu laseru a průměru fokusovaného svazku, případně poloze ohniska vůči materiálu, získáváme konkrétní velikost hustoty výkonu svazku, podle níž dělíme techniky svařování laserem na kondukční, penetrační a "keyhole svařování" vzhledem k dosahovanému poměru hloubky k šířce svaru obrázek č. 7a. Schéma svařování uvádí obrázek č. 7b. [4]



Obrázek č. 7 Laserové svařování

Svařování laserem postupně vytlačuje obloukové svařování. Aby bylo použití laseru ekonomicky výhodné, je nutná produkce velkých sérií. Ke svařování se nejčastěji používají CO₂ lasery, Nd:YAG lasery a nově především diodové lasery. Laserem se svařují hermetická pouzdra miniaturních relé, tranzistory, kardiostimulátory, mikroelektronické součástky, rámy jízdních kol, ale také plechy v automobilovém průmyslu.

Laserové zpracování povrchu

Nejčastějším použitím laseru v průmyslu je značení kovových, plastových, keramických, skleněných a dalších součástek. Popisování laserem má vysoký kontrast a je možné provést popis do libovolné hloubky. Lze popisovat geometricky složité povrchy a vytvářet složitou grafiku, texty, případně čárové kódy. Interakce svazku s materiálem vede k jeho místnímu odpaření nebo změně barvy. Popis se provádí vysokou rychlostí a jedná se bezkontaktní metodu, která neohrožuje popisovaný materiál. [4]

Mezi další povrchové úpravy patří zpevňování, texturování, gravírování atd.

3.5.2 Lasery ve vojenském průmyslu. Laserové zbraně

Technologií, které využívají lasery ve vojenském průmyslu je mnoho, jako například laserové lokace v protiraketové obraně.

Dále mluvíme v kontextu ozbrojování. Laserové zbraně už dávno nepatří jen do vědecké fantastiky. Dnes se ve většině vyspělých zemí vede rozvoj výkonných laserů, které můžou fungovat jako zbraně, popřípadě jako ochrana před jinými zbraněmi například rakety. Mezi přednosti laserových zbraní patří jejich vysoká hustota výkonu, rychlost šíření laserového svazku, laserové paprsky jsou obvykle neviditelné a neslyšitelné, a tím pádem nehrozí prozrazení pozice. Mezi nedostatky patří energetická náročnost laserů, což značně omezuje vývoj přenosných lehkých laserových zbraní. Nevýhodou je také nutnost přímé viditelnosti cíle a silná absorpce záření atmosférou, což vede k omezení dosahu těchto zbraní.[4]

Výkony laserových zbraní by mohly dosahovat od stovek wattů (zbraně pro oslnění osob nebo optických senzorů) přes desítky kilowattů (zbraně pro likvidaci přístrojů nebo osob) a stovky kilowattů (zbraně pro sestřelování vzdušných cílů) až megawattů (zbraně určené k ničení balistických raket, těžké dělostřelecké munice obrázek č. 8. [4]

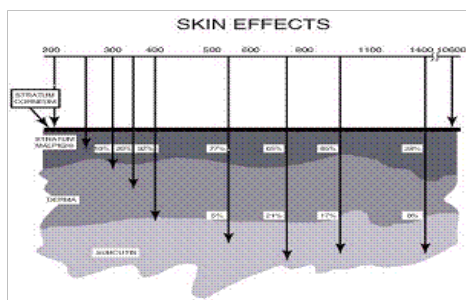


Obrázek č. 8 U.S Navy laserová zbraň (LaWS) [5]

3.6 Bezpečnost laseru

Laserové záření představuje nebezpečí pro živé tkáně i prostředí. Účinky laserového záření lze dělit na tepelné, netepelné a vedlejší. Následkem tepelného účinku může být vážné podráždění nebo devastace tkání, způsobené absorpcí velkého množství tepelné energie. Mezi následky netepelného účinku lze řadit akustický tlak, vysoce intenzivní elektrické pole nebo fotochemické účinky. Vedlejší účinky mohou představovat velké nebezpečí pro okolní prostředí, například požár od plamene, který vzniká při zpracování určitých hořlavých materiálů.

Takže při se práci s laserem musí ochraňovat nejen zrak a kůže, ale i v některých případech sluch a dýchací cesty. V první řadě se musíme zaměřit na ochranění proti zásahu samotným svazkem. Největší pozornost zaobírá ochrana zraku, protože riziko poškození lidského oka je největší ze všech. V druhé řadě, méně pravděpodobná událost, ale stále velmi nebezpečná, je zásah lidské pokožky. Zpravidla se jedná o vysoce výkonné lasery používané v průmyslu. Infračervené laserové záření může způsobit hluboké popáleniny. Hloubka penetrace závisí na vlnové délce v rozmezí 400 – 1400 nm. Od 500 nm laserový svazek penetruje do podkožní tkáně obrázek č. 9. Takové popáleniny nechávají jizvy obrázek č. 10. Kromě toho svazek může snadno vznítit oděv, následně může dojít ke zvětšení popálené plochy a hloubky.



Obrázek č. 9 Hloubka proniknutí laserového záření v závislosti na vlnové délce [6]



Obrázek č. 10 Popáleniny laserovým zářením [6]

3.6.1 Třídy bezpečnosti laseru

Na základě mezinárodních a národních norem se laserové zařízení dělí do 4 tříd. V České Republice toto upravuje nařízení vlády č.480/2000 Sb., část 139 ze dne 22. 11. 2000 a Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů č. 258/2000 ze dne 14. 7. 2000. [4]

- Třída I: Lasery všech vlnových délek o výkonu menším než $0,4 \mu\text{W}$ nebo všechny laserové systémy s libovolným výkonem, které mají zcela zakrytou dráhu svazku a pracovní plochu, všechna víka, kryty a dveře jsou zabezpečena proti neoprávněnému otevření během činnosti laseru. K práci s laserem této kategorie není třeba žádných dalších ochranných pomůcek.
- Třída II: Kontinuální lasery emitující záření ve viditelné oblasti s výkonem menším než 1 mW , před kterými je oko schopno se dostatečně chránit vrozenými reflexy, poškození však může způsobit přímý pohled po delší dobu, stejně jako do konvenčních světelných zdrojů. Oko fokusuje dopadající laserový svazek na plochu $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, což pro kontinuální výkon 1 mW představuje hustotu energie 333 W.cm^{-2} . To je přibližně $30\times$ více než při přímém pohledu do poledního letního slunce. Do této třídy patří i laserové ukazovátko, jehož běžná dostupnost dětem představuje značné nebezpečí.

- Třída III
 - a: Kontinuální lasery s výkonem menším než 5 mW, jejichž plošná hustota výkonu po fokusaci není větší než $2,5 \cdot 10^3 \text{ W.cm}^{-2}$. Oko není poškozeno, pokud okamžitě zareaguje a svazku se intuitivně vyhne. Nelze však používat pro pozorování svazku spojnou optiku. Tyto lasery musí být označeny nálepkou CAUTION nebo DANGER.
 - b: Kontinuální lasery s výkonem 5–500 mW nebo pulsní lasery s plošnou hustotou energie do 10 J.cm^{-2} , které poškozují tkáň při přímém vystavení, difúzní odraz není nebezpečný.
- Třída IV: Všechny lasery s výkonem od 500 mW nebo energií nad 10 J.cm^{-2} , jejichž difusní odraz poškodí živou tkáň. Pro práci s touto třídou laserů je bezpodmínečně nutné používat ochranné pracovní pomůcky a dodržovat předepsaný provozní řád.[4]

3.7 Metody ochrany proti laserovému záření

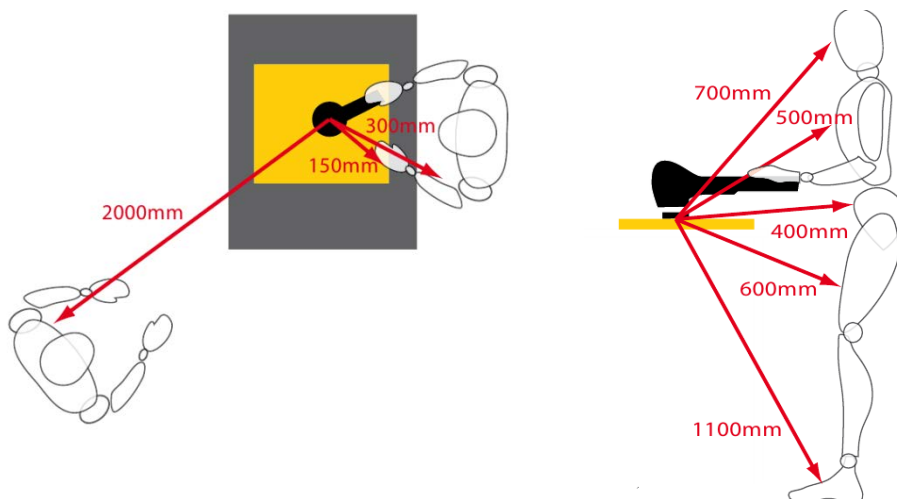
Lasery třídy III a IV představují vážné nebezpečí, jak pro živou tkáň, tak i pro okolní prostředí. Proto musí každé zařízení mít bezpečnostní pokyny a také ochranné prostředky. Dnes na trhu najdeme dost ochranných prostředků preventivního charakteru. Aby se snížila pravděpodobnost vzniku nebezpečné situace, laserové zařízení je automatizované a řízené pomocí počítače, operátor se přitom nachází v bezpečí. Software je vybaven programem, který rozpoznává pracovní prostředí a může identifikovat výskyt cizího tělesa v tomto prostředí. Jakmile bude identifikován cizí předmět v pracovním prostředí, laser ihned zastaví činnost. Stále však zůstává pravděpodobnost výskytu nepředvídatelných rizikových situací, například pokud se zpracovává materiál s reflexními vlastnostmi, tak může nastat to, že se laserový paprsek odrazí do okolí a může zasáhnout lidské oko. Dalším případem je možnost vznícení zpracovávaného materiálu, tím pádem může dojít k požáru nebo minimálně k poškození dýchacích cest. Proto každý laser má, jako součást vybavení ochranné brýle, respirátory, skleněné bariéry apod. obrázek č. 11. Pokud součástí vybavení nejsou tyto základní ochranné prostředky, je provozovatel povinen si je pořídit. [4]



Obrázek č. 11 Ochranné prostředky laserového systému [7]

3.7.1 Ochranný oděv proti laserovému záření

Co se týče ochranného oděvu, jsou využívány rukavice a kombinézy ze speciálních materiálů. Ochranný oděv je povinný, pokud operátor provádí činnost v kritické vzdálenosti od laserového paprsku, například při laserovém svařování, řezání atd. Na obrázku č. 12 je zobrazení pracovního místa a ukázka možných vzniků nebezpečí.



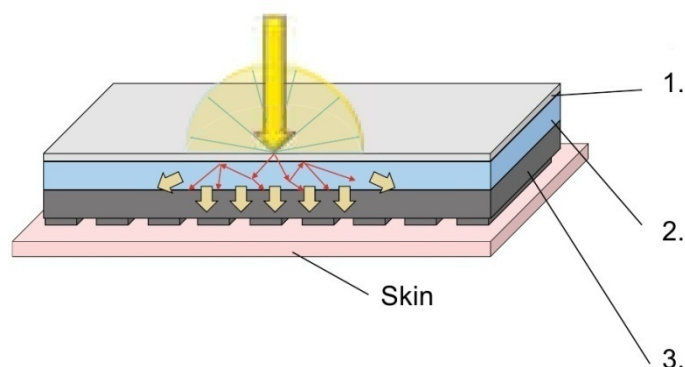
Obrázek č. 12 Nebezpečí při laserovém svařování [8]

Materiál ochranného oděvu musí mít zpravidla vlastnosti, které mohou zabránit proniknutí laserového paprsku. Můžou to být reflexní materiály, které mohou odrážet paprsek nebo ho rozptylovat, ale přitom stejně dochází k absorpci tepelné energie, takže materiál musí mít i izolační vlastnosti. Řešením může být použití vícevrstvé struktury, kde každá vrstva bude plnit izolační funkce. Podle elektrické analogie přenosu tepla, tepelný odpor vícevrstvé struktury se vypočítá jako součet odporu jednotlivých vrstev. Takže vlastnosti materiálu pro vícevrstvou strukturu by podstatně ovlivňovaly tepelný odpor vícevrstvé struktury, tedy ovlivňovaly účinnost ochrany.

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

Na trhu dnes existují návrhy pracovního oděvu s lasery od firmy JUTEC, které využívají třívrstvé struktury pro návrh rukavic a kombinéz obrázek č. 13. Každá vrstva má svojí funkci:

1 - vnější vrstva, rozptyluje emitované záření, 2 – střední vrstva, také rozptyluje záření, aby se zvýšil objem absorpce, 3 – rubní vrstva, materiál s izolační vlastností, zabraňuje vedení tepla. Požadavkem na všechny tři vrstvy: nehořlavost, tepelná odolnost. [8]



Obrázek č. 13 Vícevrstvá struktura chránící před laserovým zářením [8]

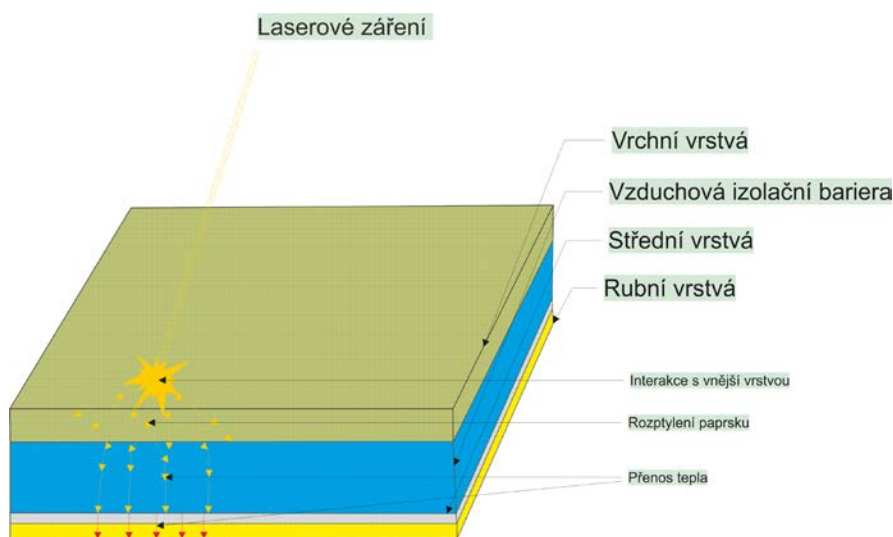
4 Možnosti návrhu vícevrstvé struktury

V souvislosti s vlastnostmi textilního materiálu a laseru se může navrhnout účinná ochranná textilie. Je důležité vědět, jak účinkuje laserové záření na textilní materiál. Energetický účinek laserového záření na materiál je ovlivněn řadou faktorů jako: parametry laseru - vlnová délka, šířka pulsu atd.; fyzikální vlastností materiálu – tepelná vodivost, charakteristiky povrchu; doba interakce. Výsledek interakce laserového záření a materiálu je také významně závislý na absorpčním součiniteli. Tento součinitel je určen druhem materiálu, stavem jeho povrchu a teploty, vlnovou délkou. Absorbance je nepřímo úměrná vlnové délce, přímo úměrná teplotě materiálu a zvětšuje se úpravou povrchu. [9]

4.1 Vícevrstvá struktura s využitím vzduchové izolační bariéry

Jednotlivé vrstvy mohou být z různých materiálů. Pro vnější vrstvu mohou být použité materiály, které dobře absorbují nebo rozptylují dopadající laserové záření. Střední vrstva může být z materiálu s izolačními vlastnostmi. Rubní vrstva může být z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. Do vícevrstvé struktury lze vložit vzduchovou izolační bariéru, která bude umístěna mezi vnější a rubní vrstvou. Umístění relativně k střední vrstvě může být buď před, nebo za. Uskutečnit model se vzduchovou izolační bariérou lze pomocí použití pěnového materiálu. Pěnový materiál může díky vysokému obsahu plynu sloužit, jako "vzduchová bariéra". Ta se často používá jako klíčový element pro izolace tepla. Kromě toho v daném modelu významně zvýší objem absorpce pohlceného záření a také zabrání k rychlému přenosu generovaného tepla k rubní straně. Důležitým faktorem, který se musí optimalizovat je tloušťka tzv. "vzduchové bariéry" nebo distanční vzdáleností mezi vrstvami.

Zvýšení tloušťky mezery povede ke zvýšení jejího tepelného odporu a následně k lepší ochraně. Správné zvolení materiálu každé vrstvy může vést k výbornému řešení vícevrstevných struktur chránících před laserovým zářením. Přibližný model je zobrazen na obrázku č. 14.



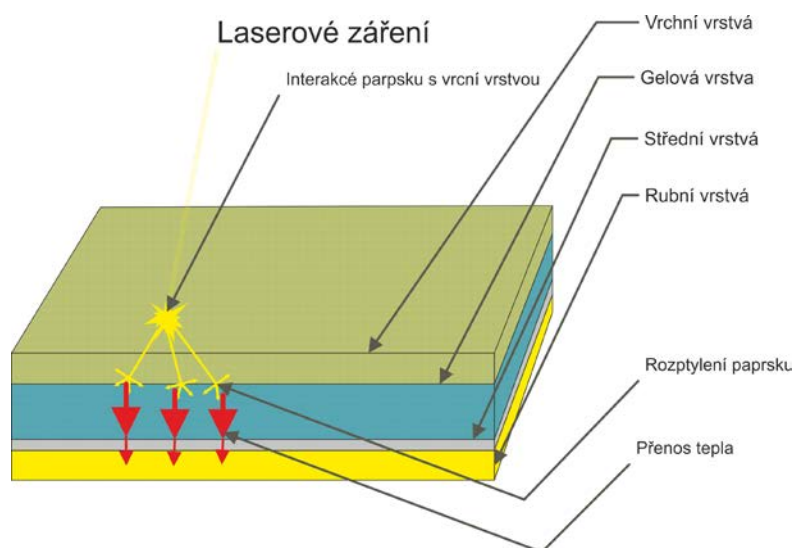
Obrázek č. 14 Model vícevrstvé struktury se "vzduchovou bariérou"

V tomto modelu laserové záření dopadá na povrch vnější vrstvy a dochází k interakci mezi nimi. Záření se pohlcuje vnější vrstvou a částečně dojde k poškození materiálu. Dále se pohlcená energie ve formě tepla přenáší do dalších vrstev přes "vzduchovou bariéru", takže se jedná o přenos tepla. Zde je třeba připomenout, že pokud se jako "vzduchová bariéra" uplatní pěnový materiál, jedná se o přenos tepla vedením. Pokud se jedná vyloženě o vzduchovou mezeru, tak mluvíme o kombinovaném přenosu tepla. Další vrstvy už splňují izolační funkci.

4.2 Použití gelového materiálu ve vícevrstvé struktuře

Laserové záření může být dobře pohlceno dielektrickými materiály, jako jsou voda, gelový materiál, biologické textilie atd. Jako vhodnou možností je použití gelového materiálu, buď ve formě granulí nebo impregnované textilie. Může to být tzv. „aerogel“ nebo textilie modifikované karboxymethylcelulózou (CMC bavlna) atd. Faktorem, který se musí optimalizovat je množství dané látky, v případě CMC bavlny množství vody. Výhodou „aerogelu“ jsou jeho vlastnosti jako: nízká hustota, nízká tepelná vodivost, vysoký specifický povrch a je výborným izolačním materiálem. Používá se v stavebnictví, letectví a v obranném průmyslu. Voda se vyznačuje unikátní schopností absorbovat teplo, aniž by se extrémně zvyšovala v teplotním stavu. Tato schopnost je významná pro chladicí systémy např. v radiátoru aut a dalších chladicích mediích.

CMC bavlna se vyznačuje tím, že dokáže nasakovat vodu a následně dochází k bobtnání. Tak se CMC bavlna stává podobná gelovému materiálu, který se dá použít ve vícevrstvé struktuře stejně, jako „aerogel“. Model s vložením gelové vrstvy je zobrazen na obrázku č. 15.



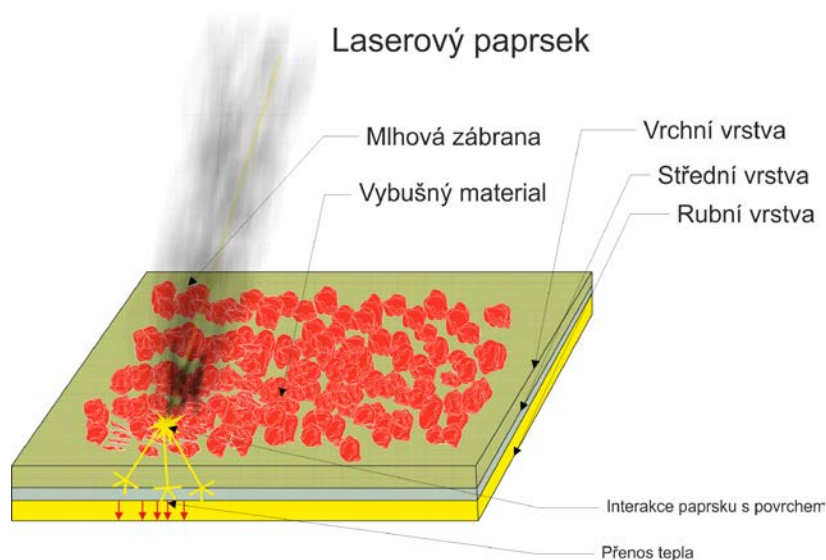
Obrázek č. 15 Model s využitím gelové vrstvy

Při interakci laserového záření s vnější vrstvou dochází k absorpci energie a k zahřívání dané vrstvy, dále je teplo absorbováno gelovým materiálem. V případě s CMC bavlnou, se začne obsahovaná voda zahřívát a dojde k odpařování. Teplo odpařováním zvýší teplotu vnější vrstvy a podílí se na absorpci laserového záření. Varianta s CMC bavlnou se dá zařadit do aktivní ochrany. „Aerogel“ díky své nízké tepelné vodivosti je schopný zabraňovat přenosu velkého množství tepla. Takže střední vrstva není nezbytnou složkou modelu.

4.3 Ochranná struktura ve vojenském průmyslu

Výkon vojenských laserů je podstatně větší, řádově od 100 W až 100 mW. Aby se zabránilo takovému množství energie soustředěnému na malou plochu, nestačí ani vícevrstvá struktura se všemi možnostmi, ani vysoce reflexní materiál. Zde lze uplatnit nedostatek laseru, kterým je předpoklad čistého prostředí, ve kterém se šíří laserové záření. Jakmile je toto prostředí zaplněno plyny, laserové záření se rozptyluje a ztrácí energii. Ve výsledku poškození materiálu nebo cíle, bude přenášená energie významně snížena. Jako varianta se může uplatnit tzv. „mlhová zábrana“, která může zastínit sluneční záření. Podobně lze vytvořit takovou zábranu na cestě laserovému záření, a to pomocí výbušných látek, které při explozi vydávají kouř. Výbušné látky se můžou uplatnit jako povrchová úprava vnější vrstvy vícevrstvé struktury. Optimalizačním faktorem je opět množství dané látky. Dále záleží na rychlosti výbuchu daného materiálu. Laserová zbraň, která je schopna zlikvidovat osobu má

výkon 10 kW, takže při styku laserového svazku a materiálu, musí výbušná složka ihned explodovat a vytvořit kouř. Zároveň exploze rozptýluje a snižuje účinnost laserového záření. Model s aktivní ochranou je zobrazen na obrázku č. 16.

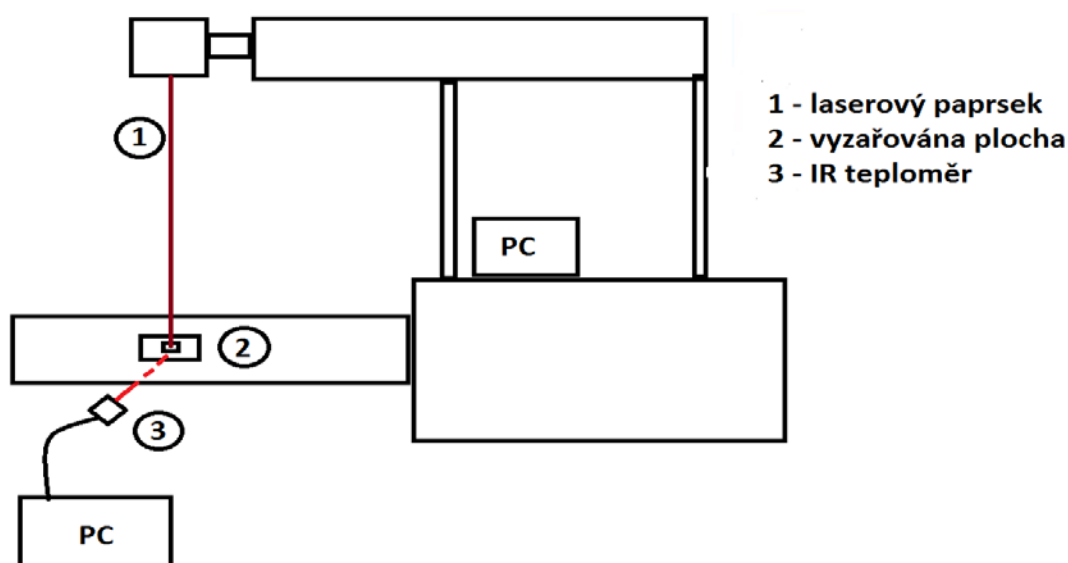


Obrázek č. 16 Model s použitím explodované složky

V okamžiku kdy laserové záření dosáhne povrchu materiálu, dojde k okamžitému explodování a vytvoření smogu. Energie laserového záření je pohlcena a rozptýlena explozí. Dále je energie přenášena do dalších vrstev, tj. mluvíme o přenosu tepla. Na charakteru exploze závisí kolik tepla bude přenášeno do dalších vrstev. Pokud exploze byla krátkodobá a nevytvořila dostatečný objem smogu, nedojde k účinnému rozptýlení laserového záření a dojde k přenášení velkého množství tepla skrz všechny vrstvy. Takže exploze látky musí být reaktivní a vydávat dostatečný objem smogu. Dále můžeme mluvit o kombinaci daného modelu s ostatními, buď vložit "vzduchovou bariéru", nebo gelovou vrstvu.

5 Návrh experimentu

V této části daného studia budou provedeny experimenty zaměřené na zkoumání vícevrstvých struktur chránících před laserovým zářením. Za tímto účelem budou použity modely struktur z předchozí kapitoly, jako základ. Pro simulaci každé vrstvy budou použity dostupné materiály přibližně odpovídající požadavkům příslušného modelu. Dále textilní útvary budou ozářeny laserovým paprskem. K tomuto účelu bude sloužit CO₂ laserové zařízení 150 Flexi Marcatex, který pracuje v pulzním režimu a má vlnovou délku 10,6 μm . Průměrný výkon daného laserového zařízení je 150-250 wattů, nejvyšší hodnota 400 wattů. Hlavním cílem experimentu bude měření teploty na rubové straně, která bude sloužit, jako hlavní kritérium zda je model účinný nebo ne. Také se bude sledovat chování modelu, zejména interakce laserového paprsku s vrchní vrstvou struktury. Pro měření teploty bude použit infračervený teploměr Optris, který měří teplotu v rozmezí -35 až +900 °C. Teploměr bude zapojen do počítače a naměřená teplota bude zobrazována v softwaru Optris Connect.



Obrázek č. 17 Grafické znázornění experimentu

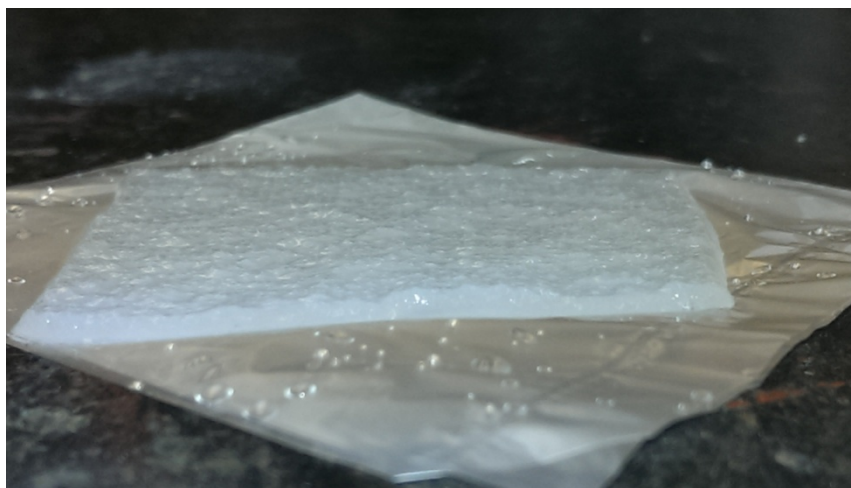
Vybrané modely struktur

Model se "vzduchovou bariérou"

Pojem "vzduchová bariéra" můžeme chápat, jako prázdný prostor, tak i pórovité materiály s obsahem plynu nebo vzduchu. Nejdříve budou provedeny zkoušky s vytvořením prázdného prostoru mezi jednotlivými vrstvami. Vrchní vrstva bude z nehořlavé čedičové textilie, díky svým tepelně izolačním vlastnostem dokáže rozptylovat a účinně absorbovat množství energie vykonané při interakci s laserovým paprskem. Střední vrstva bude z alobalu, který bude sloužit pro minimalizaci přenosu tepla. Může být umístěn buď nad vzduchovou mezerou nebo pod ní. Rubní vrstva bude z bavlny, která má relativně nízkou tepelnou vodivost. Pro simulaci vzduchové mezery lze použít také pěnový materiál. Obecně jsou dostupné polyuretanové pěny s různými modifikacemi podle účelu použití. V experimentu je použita standardní polyuretanová pěna používaná v čalounictví, která má dostatečné vlastnosti pro splnění funkce "vzduchové mezery".

Model s gelovou vrstvou

Základní tři vrstvy zůstanou stejné. Mezi vrchní a střední vrstvou se vloží gelový materiál. Roli gelové vrstvy bude splňovat modifikovaná bavlna - CMC bavlna. Při styku s vodou tento materiál zgelovatí, čímž splní funkci gelové vrstvy obrázek č. 18. Samotný materiál má řadu nevýhod: těžká uplatnitelnost materiálu v technologiích výroby, je potřebná reakce s vodou, opakované použití je minimální.



Obrázek č. 18 Grafické znázornění experimentu

Model s aktivní ochranou

Základní vrstvy zůstanou stejné, akorát na vrchní vrstvu budou nasypány aktivní látky. Pro experiment byl výběr chemických látek následující: uhličitan amonný, chlorid amonný. Také byl použit materiál používaný pro vytvoření hlavičky sirky, který dále bude nazýván výbušný prach. Chlorid amonný je bílý krystalický prášek s chemickým vzorcem NH_4Cl . Rozpouští se ve vodě, vodný roztok je slabě kyselý. Vyskytuje se, jako "nerost salmiak" a to zejména v hořících uhelných slojích, kde kondenzuje z plynů vznikajících při hoření a také v některých sopkách. Používá se jako potravinářský přídatek, v dýmovnicích atd. Díky své schopnosti vytvořit dým při styku s laserovým paprskem, může vytvořit takzvanou "mlhovou zábranu". Uhličitan amonný je amonná sůl, která má chemický vzorec $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Při styku se vzduchem vylučuje amoniak, který je znám chladicí schopností. Při teplotě 60°C se rychle rozpadá na NH_3 , CO_2 a H_2O . Samotná látka se používá jako komponent hasicích prostředků, potravinářský přídatek E503 atd. Oproti chloridu amonnému tato látka při styku s laserovým paprskem vyloučí plyn, který má chladicí vlastnosti. Výbušný prach při styku s laserovým paprskem exploduje a tím ho rozptýlí, zároveň vytvoří dým a tím vznikne "mlhová zábrana".

Kombinovaný model "vzduchová mezera + aktivní ochrana"

Kombinací dvou modelů lze dosáhnout vyšší účinnosti struktury. Reaktivní vrstva dokáže efektivně rozptylovat laserový paprsek, avšak nejde o úplnou redukci přenosu tepla. Vzduchová mezera může zabránit přenosu tepla a tím dosáhneme zvýšení účinnosti ochrany.

Charakteristika použitých materiálů

Čedič

- Plošná hmotnost - $1468 [\text{g}/\text{m}^2]$
- Tloušťka [mm] - 0,33
- Měrná tepelná kapacita - $920 [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
- Teplota měknutí - $1500\text{-}1700 [^\circ\text{C}]$
- Tepelná vodivost - $0,031 - 0,038 [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$

Bavlna

- Plošná hmotnost - $640 \text{ [g/m}^2\text{]}$
- Tloušťka - $0,58 \text{ [mm]}$
- Měrná tepelná kapacita - $1210 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$
- Teplota rozkladu - $200\text{-}280 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Tepelná vodivost - $0,54 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$

Allobal

- Plošná hmotnost - $2,7 \text{ [g/m}^2\text{]}$
- Tloušťka - $0,02 \text{ [mm]}$
- Měrná tepelná kapacita - $896 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$
- Teplota tavení - $660 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- Tepelná vodivost - $235 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$

CMC bavlna

- Plošná hmotnost - $103 \text{ [g/m}^2\text{]}$
- Tloušťka - $0,2 \text{ [mm]}$

Polyuretanová pěna

- Tloušťka - 10 [mm]
- Objemová hmotnost - $18 \text{ [g/m}^3\text{]}$
- Typ - lehčený polyuretan

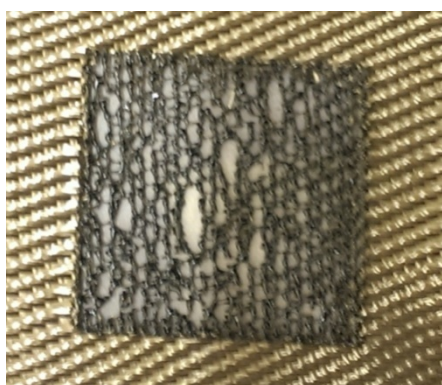
5.1 Nultý experiment. Zkoušení základních materiálů

V počátečním experimentu byly ozářeny základní materiály čedič a bavlna samostatně a také navrstvené na sebe. Vzorčky materiálů měly rozměr $7\times 7 \text{ cm}$, ozařovaná plocha pak měla rozměry $5\times 5 \text{ cm}$. Tyto rozměry byly vybrány přípravnými pokusy, které vedly k optimálnímu nastavení parametru laserového záření, jako je šířka pulsu $10 \text{ bit}/\mu\text{s}$. Doba ozařování plochy $5\times 5 \text{ cm}$ je pak 16 sekund. Tyto nastavení jsou vyhovující a splňují požadavek testování za vyšších teplot lokálně převyšujících $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento požadavek maximálně přibližuje experiment k podmínkám reálné nebezpečné situace, která může nastat. Každá položka byla ozářena 5 krát. Dále byla vypočtena popisná statistika.

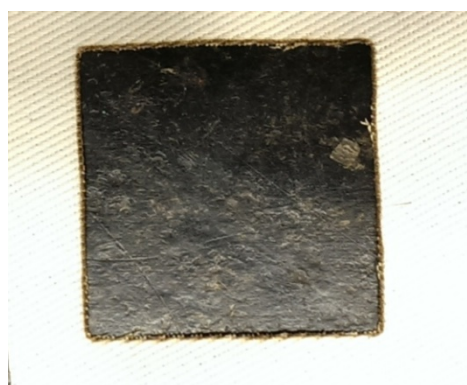
Tabulka č. 2 Výsledky nultého testu

n	Čedič T[°C]	Bavlna T[°C]	Čedič-bavlna T[°C]	Čedič-alobal- bavlna T[°C]
1	520,00	323,00	430,00	211,00
2	563,00	333,00	460,00	254,00
3	613,00	315,00	333,00	217,00
4	740,00	310,00	458,00	206,00
5	524,00	320,00	411,00	189,00
průměr	592,00	320,20	438,40	215,40
sm.odch	90,82	8,70	20,62	23,96
95%IS	479,23	309,39	412,79	185,64
	-	-	-	-
	704,77	331,00	464,00	245,15
var.koef [%]	15,00	2,70	4,70	11,13

Samotný čedič vydrží extrémní teploty v rozmezí -260 až 980 °C. V interakci s laserovým zářením došlo k destrukci struktury materiálu, díky vysoké hustotě přenášené energií v lokálním místě obrázek č. 19. Bavlna svou povahou není odolná vysokým teplotám, její teplota rozkladu je 260 °C. Při interakci s laserovým zářením průměrná teplota činí 320 °C, přitom se materiál úplně vypálí obrázek č. 20. Při navrstvení obou materiálů, bavlna začíná doutnat obrázek č. 21. Po vložení alobalu mezi čedič a bavlnu se teplota výrazně snížila, přitom bavlna zhnědla obrázek č. 22. Takže čedič-alobal-bavlna nadále bude považována, jako základní struktura a průměrná teplota 215,4 °C bude relativním počátkem pro další experimenty. Průměrná teplota základní struktury před ozářením byla 24 °C.



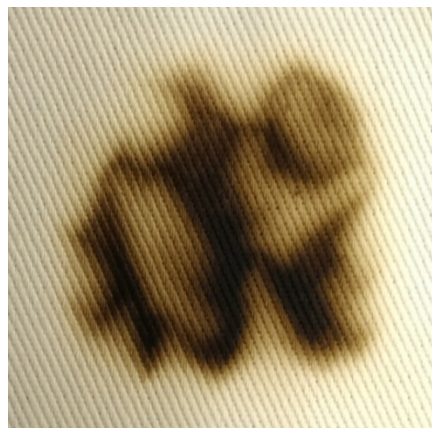
Obrázek č. 19 Nultý test. Destrukce čediče



Obrázek č. 20 Samostatná bavlna po interakci s laserovým paprskem



Obrázek č. 21 Doutnání bavlny



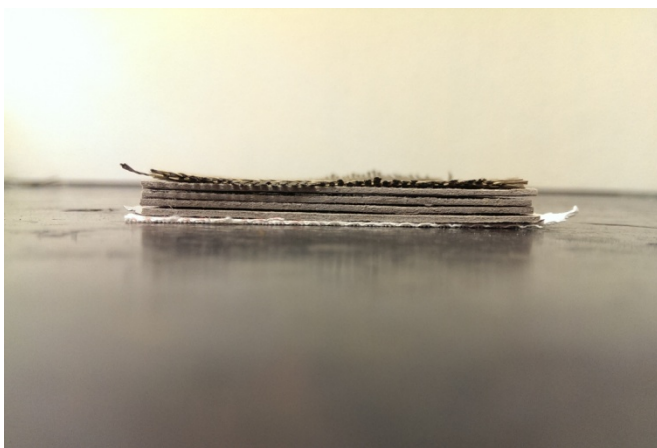
Obrázek č. 22 Zhnědnutí bavlny

5.2 Experiment 1. Vícevrstvá struktura s využitím vzduchové izolační bariéry

V prvním experimentu bude zkoušena struktura s vložením vzduchové izolační bariéry mezi jednotlivé základní vrstvy. Experiment je rozdělen do dvou částí.

Část 1

Experiment bude proveden s vložením prázdného prostoru mezi jednotlivé vrstvy. V dané části experimentu se zkoušel vliv tloušťky vzduchové mezery na výslednou teplotu měřené na rubní straně. Tloušťka mezery se zvětšovala z 2 mm až do 10 mm, krok posunutí 2 mm. Pro měření na každé úrovni bylo připraveno 5 vzorků, tedy 5 replikací. Mezeru vytvoříme pomocí rámečku o tloušťce 1 mm s vnitřní plochou 5×5 cm viz obrázek č. 23. Pro statistické ověření vlivu tloušťky vzduchové mezery se použije metoda ANOVA.



Obrázek č. 23 Ukázka experimentálního vzorku

Podle vzorce(1) tepelného odporu očekáváme, že se s zvyšující tloušťkou R-hodnota celé struktury bude také zvyšovat. Teplota na rubní straně se bude snižovat.

Také se ověřoval vliv umístění vrstvy alobalu před vzduchovou mezeru a za ní. Tím pádem vznikají dvě možnosti, které nazveme kombinace A) čedič-vzduchová mezera-alobal-bavlna a B) čedič-alobal-vzduchová mezera-bavlna. U kombinace B předpokládáme, že díky reflexním vlastnostem alobalu laserový paprsek se víc rozptýlí a tím dosáhneme lepších výsledků než u kombinace A. Pro ověření je dostatečný výpočet základní popisné statistiky a zejména parametr variability, jako intervalový odhad. Výsledky základní popisné statistiky jsou znázorněny v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3 Naměřená data experiment 1

	Kombinace A. T [°C]					Kombinace B. T [°C]				
Tloušťka mezery [mm]	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
1	153,00	74,00	72,00	51,70	45,30	126,00	86,00	69,10	45,50	36,30
2	105,00	93,00	66,00	50,50	47,00	88,60	114,50	62,40	48,50	39,50
3	121,60	85,00	63,00	49,30	48,00	82,70	82,00	66,60	47,90	41,00
4	115,80	89,90	61,00	51,30	47,40	118,30	85,90	62,50	49,30	46,40
5	147,00	80,70	64,90	57,90	46,60	112,50	87,70	70,40	50,60	44,30
průměr	128,50	84,50	65,40	52,10	46,80	105,60	91,20	66,20	48,30	41,50
sm.odch	20,63	7,52	4,16	3,34	1,01	18,96	13,18	3,68	1,89	3,97
95%IS	102,80	75,20	60,20	48,00	45,60	82,10	74,80	61,60	46,00	36,60
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	154,10	93,80	70,50	56,30	48,10	129,10	107,60	70,80	50,70	46,40
var.koef [%]	16,00	8,90	6,40	6,40	2,20	17,90	14,40	5,60	3,90	9,60

Intervalový odhad měření obou kombinací na každé úrovni se překrývá. Na základě toho můžeme tvrdit, že rozdíl mezi kombinacemi A a B není statisticky významný. Umístění alobalu nemá významný vliv. Přitom v kombinaci B došlo k destrukci alobalu, protože je umístěn v bodě vysoké koncentrace tepelné energie obrázek č. 24.



Obrázek č. 24 Vzorek po ozáření a destrukce alobalu

Test ANOVA experiment 1

Vliv faktoru tloušťky na teplotu rubní strany bude vyhodnocen pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu v programu Minitab. Analýza bude provedena pouze pro kombinaci B, která je vhodná pro další část experimentu. Pro kombinaci A není nutné provádět analýzu rozptylu, protože bylo zjištěno že není statisticky významný rozdíl mezi těmito kombinacemi a výsledek analýzy by byl shodný.

Nulová hypotéza H_0 : všechny průměry jsou stejné

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots \mu_i$$

Alternativní hypotéza H_1 : alespoň jeden z průměru je odlišný

$$\mu_1 \neq \mu_2 = \mu_3 \dots \mu_i$$

Hladina významnosti $\alpha = 0,05$ a předpoklad, že rozptyly nejsou významně rozdílné.

Tabulka č. 4 Informace o faktoru

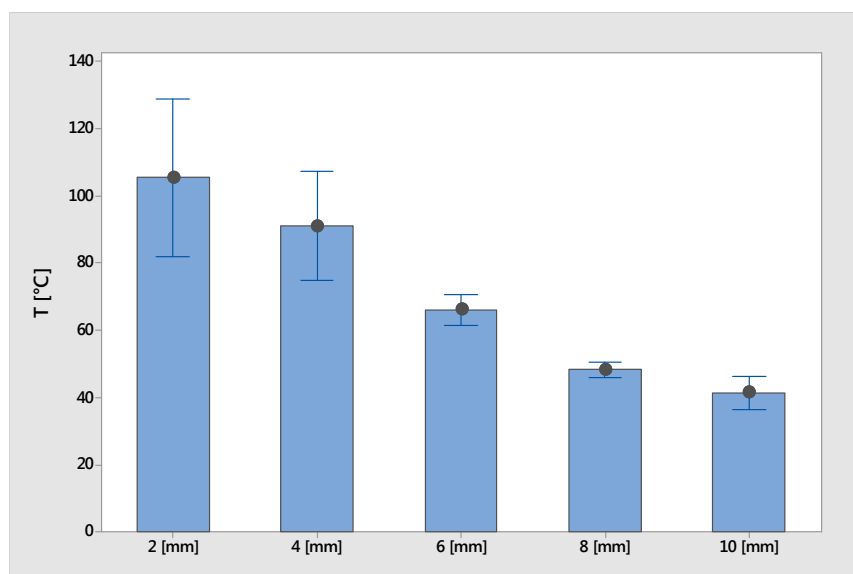
Faktor	Počet úrovní	Hodnoty úrovně[mm]
Tloušťka	5	2 - 4 - 6 - 8 - 10

Tabulka č. 5 Vystup analýzy rozptylu kombinace A

Zdroj proměnlivosti	Stupně volností	Součet čtverců	Průměrný čtverec	F-hodnota	P-hodnota
Variabilita mezitřídní (mezi úrovní tloušťky)	4	21783	5445,7	53,18	$1,41 \times 10^{-8}$
Variabilita uvnitř třídy	20	2048	102,4		
Celková variabilita	24	23831			

Pro ověření vlivu faktoru tloušťky z výsledné tabulky analýzy rozptylu vezmeme parametr P-hodnota a porovnáme s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Sledovaný faktor má vliv, protože p-hodnota se blíží k nule a je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

Tím byl teoretický model potvrzen a bylo dosaženo významného poklesu teploty z 215,4 °C až na 41,5 °C obrázek č. 25.



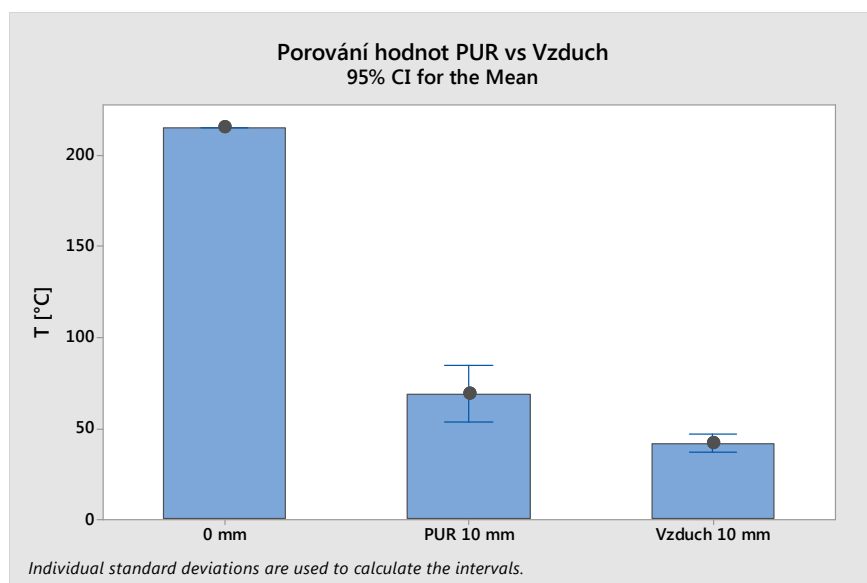
Obrázek č. 25 Grafické zobrazení výsledků experimentu 1. Kombinace B

Část 2

V druhé části experimentu 1 byl použit pěnový materiál na bázi polyuretanu, jako izolační bariéry. Postup zkoušky byl úplně stejný, jako v první části a uspořádání materiálu bylo stejné, jako u kombinace B. Výsledek byl pak porovnán s hodnotami kombinací B na úrovni 10 mm obrázek č. 26.

Tabulka č. 6 Výsledky zkoušky druhé části experimentu 1

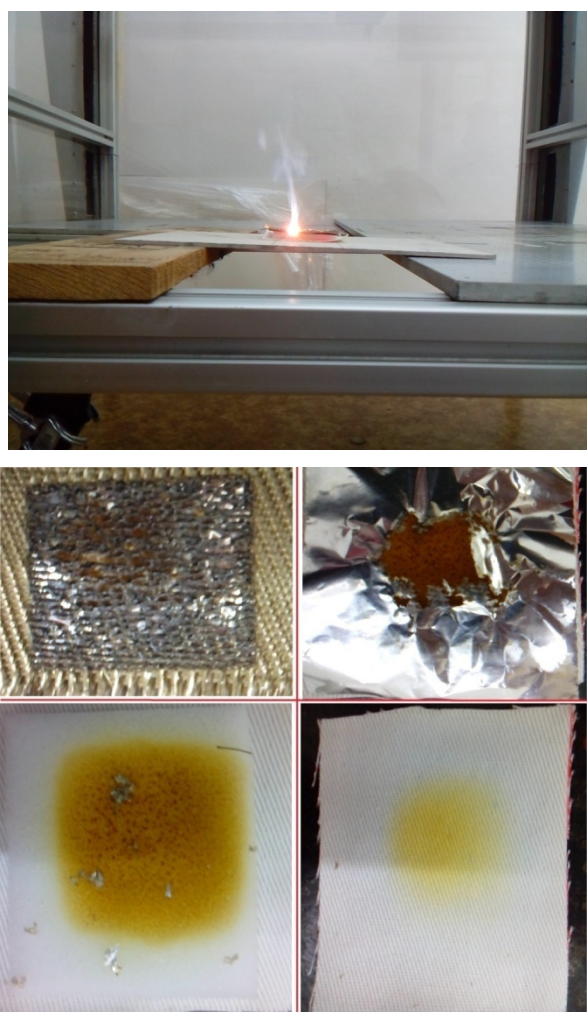
	T [°C]
1	90.70
2	57.60
3	68.00
4	63.40
5	64.70
Průměr	68,88
sm.odch	12,76
95%IS	59,55 - 78,21
var.koef [%]	18,53



Obrázek č. 26 Polyuretanová pěna proti vzduchové mezeře

Průměrná teplota struktury s izolační bariérou z polyuretanové pěny ukázala horší výsledky oproti vzduchové mezeře. Je to ovlivněno tím, že izolační bariéra ze vzduchu má nižší tepelnou vodivost než je u polyuretanové pěny. Polyuretanová pěna je sice velmi pórovitý materiál, ale vodivost hmotné složky zvyšuje tepelnou vodivost materiálu. Proto na stejné vzdálenosti polyuretan prokazuje horší výsledek než samotný vzduch. Vzhledem k tomu, že použitý materiál nebyl nijak modifikován k izolačním účelům, prokázal relativně dobré výsledky. Teplota oproti základní struktuře bez mezery klesla v průměru o 146 °C, což je významný efekt.

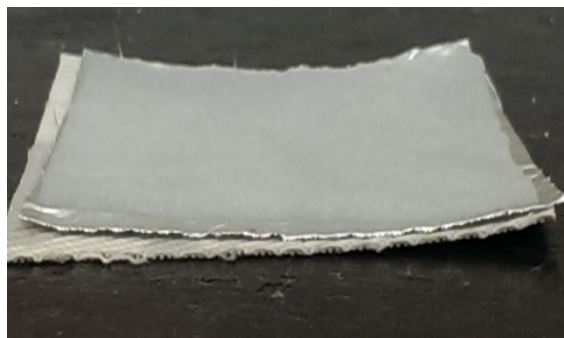
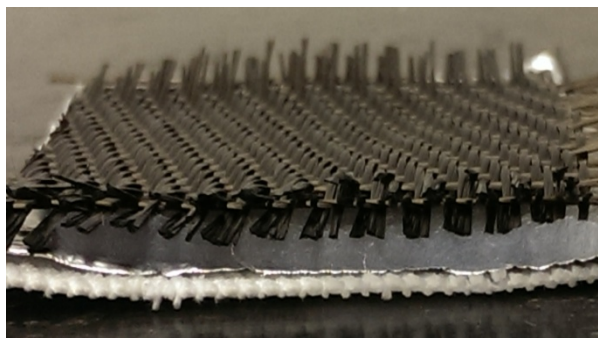
Materiály při interakci s laserovým zářením se chovaly stejně, jako v první části: došlo k destrukci čedičové vrstvy, alobalu a polyuretanová pěna bylo roztavena. Při roztavení došlo k vytvoření močoviny, což obarvilo rubní vrstvu. Na obrázku č. 27 jsou účinky laserového záření na strukturu.



Obrázek č. 27 Experiment 1 část 2. Destrukce čediče a roztavení polyuretanové pěny

5.3 Experiment 2. Gelová vrstva

V daném experimentu se zkoušela struktura s vložením gelové vrstvy obrázek č. 28 která by teoreticky měla účinně rozptylovat záření a pohlcovat vykonanou energii. Zastupovat gelovou vrstvu bude CMC bavlna, která s přidáním objemu vody zgelovává. Takže budeme testovat vliv objemu přidávané vody na účinnost struktury, tedy na teplotu rubní strany. Gelová vrstva je umístěna mezi čedičem a alobalem.



Obrázek č. 28 Vzorek experiment 2

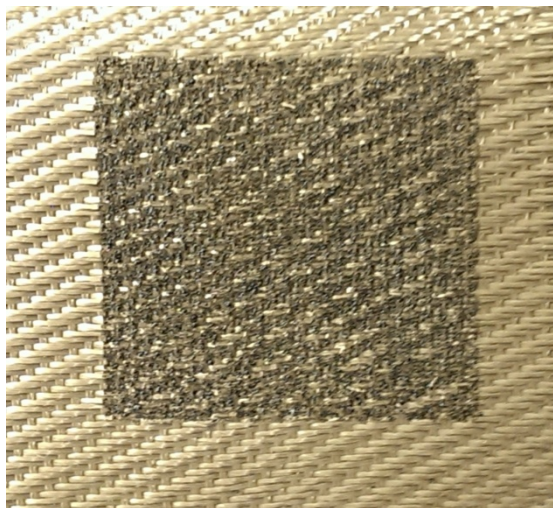
Očekáváme nějakou závislost mezi faktorem objem vody a teplotou na rubní straně. Tato závislost se zhodnotí regresní analýzou. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7 Naměřená data experiment 2

Objem vody [ml/25 cm ²]	T[°C]
0	207,9
0,5	68,7
1	58,6
2	64,5
3	61,9
4	45,9
5	46,9
6	43,4
7	34,1

První měření bylo prováděno s vložením CMC bavlny, ale bez přidání vody. Naměřená hodnota je pak počátečním bodem, který bude zahrnut v regresní analýze. Maximálně možný objem vody, který absorbuje CMC bavlna o ploše 5x5cm je 7 ml.

Při interakci s laserovým zářením vrchní čedičová vrstva utrpěla menší destrukce oproti struktuře se vzduchovou mezerou. Je to ovlivněno tím, že čedičová vrstva je navlhčena gelovou vrstvou a čím větší je objem přidané vody, tím menší je destrukce čediče obrázek č. 29.



Obrázek č. 29 Destrukce čediče v experimentu 2

Na nejnižší úrovni faktoru $0,5 \text{ ml}/25 \text{ cm}^2$ je naměřená teplota $68,7^\circ\text{C}$ oproti počátečnímu bodu je to rapidní pokles. Dále hodnoty teploty klesají s lineárním trendem. Takže pro regresní analýzu se musí využít nelineární regresní model. Vhodným modelem pro takovéto případy je regrese po částech spojitě lineární závislosti. Ve statistice se používá název pro tento model - "Joinpoint regrese".

Joinpoint regrese

Regrese joinpoint (segmented regression, piecewise regressions) jedná se o model, v němž je závislá odezva na vysvětlující proměnné popsána po částech pomocí lineární spojitě funkce. Jejíž směrnice se mění v několika obecně neznámých bodech zlomu (transition points, break-points, joinpoints). V některých reálných situacích takovýto model vyvstává zcela přirozeně ze základu sledovaného problému, jinde ho lze s úspěchem použít k přibližnému popsání komplikovanější nelineární závislosti. Důležitou částí v mnoha aplikacích je identifikace bodu zvratu, při kterém dochází ke změně směrnice závislosti. [10]

Je prokázáno, že joinpoint model je speciální případ regresního splinu, kdy po odhadované funkci je vyžadována pouze spojitost. Body zvratu při této regresi mají často velmi konkrétní význam (např. biologický nebo fyzikální), jelikož v nich dochází ke strukturální změně

sledované závislosti. Proto je nutný odhad jejich počtu, polohy a věnovat tomu větší pozornost než v případě obecných splinů.

Pro odhad daného typu regresní závislosti existují speciální softwary, jako Joinpoint Regression Program, který byl vyvinut pro statistické zpracování dat v medicíně.[10]

Metoda regresní analýzy v programu Joinpoint Regression Program

V programu se využívá postup navržený v článku [11], kterým se nalezne počet bodů zvratu, včetně jejich polohy a parametrů odhadovaného modelu. Identifikace počtu bodů zvratu je založena na sekvenci několika permutačních testů, které jsou založeny na modifikaci klasické F-statistiky. Testy splňují předepsané hladiny spolehlivosti asymptoticky a jejich p-hodnoty jsou spočteny pomocí Monte Carlo metody. Opakované testování je ošetřeno Bonferroniho korekcí. Parametry modelu jsou odhadovány metodou grid search navrženou v článku [12]. Body zvratu jsou nalezeny iteračně (prohledáváním mřížky) a odhad ostatních regresních parametrů je proveden metodou nejmenších čtverců, respektive vážených nejmenších čtverců.

Regresní model

V případě, který řešíme už intuitivně můžeme odhadnout bod zvratu funkce a vytvořit dva modely zvlášť. Ale tím vyřadíme počáteční bod z analýzy, pro lepší vysvětlení jevu můžeme použít lineární model joinpoint. Pak model pro naměřená data experimentu 2 mohou být zapsána jako:

$$E[y|x] = a_0 + a_1 \times x + a_2(x - \tau_1) + \dots + a_i(x - \tau_k)$$

definice x podle bodu zvratu:

$$x = \text{objem vody} \left[\frac{ml}{25 \text{ cm}^2} \right], \tau_1 = \begin{cases} 1 & x \geq \tau_1 \\ 0 & x < \tau_1 \end{cases}$$

dále model se rozloží na 2 části:

$$E(y) = \begin{cases} a_0 + a_1 \times x, & x < \tau_1 \\ a_2 + a_3 \times x, & x \geq \tau_1 \end{cases}$$

Takže máme 4 odhadované parametry:

a_0, a_2 – úseky, a_1, a_3 – směrnice

Poloha bodu zvratu bude také odhadována v teoretickém modelu.

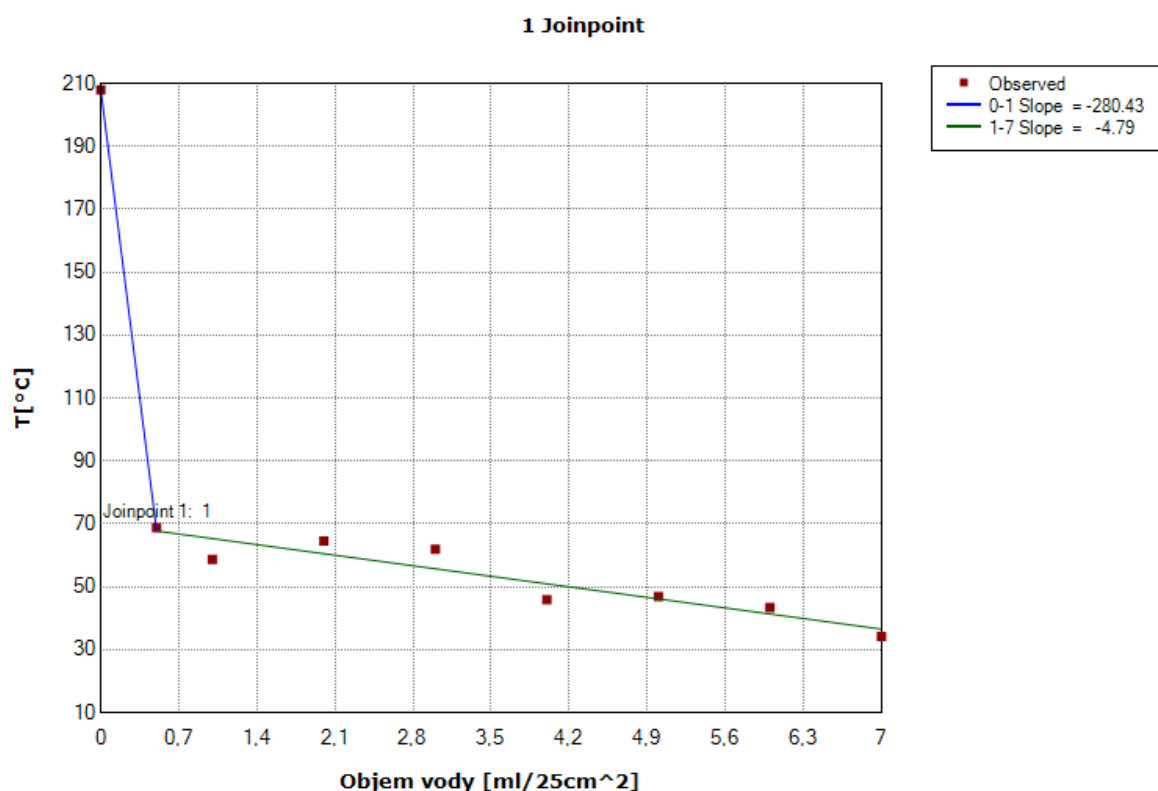
Regresní analýza experimentu 2

Výsledky regresní analýzy jsou znázorněny v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8 Odhady regresních parametrů

Parametr	Odhad	Standardní chyba	Testová statistika	p-hodnota	R^2
a_0	207.90	5.18	40.08	0.000000	1,00
a_2	70.08	4.38	15.98	0.000017	
a_1	-280.43	-	-	-	0,86
a_3	-4.79	0.98	-4.89	0.004507	

Vliv faktoru je statisticky významný, regresní model obrázek č. 30, je spolehlivý vysvětluje 86% variability dat pod bodem zvratu.



Obrázek č. 30 Regresní model joinpoint

Model zcela vyjadřuje vliv objemu přidávané vody. Malé množství vody může vyvolat rapidní pokles teploty a po určitém bodu klesá pomaleji s lineárním trendem. Teoretické hodnoty a regresní rovnice jsou znázorněny v tabulce č. 9. Takže ve výsledku budeme mít dvě rovnice podle definice regresoru x - objem přidávané vody. První rovnice platí pro hodnoty regresoru menší než bod zvratu, druhá rovnice platí pro hodnoty větší nebo rovné bodu zvratu.

Tabulka č. 9 Teoretické hodnoty a regresní rovnice

Objem vody [ml/25 cm ²]	Naměřená Hodnota	Teoretická Hodnota	Poloha bodu zvratu	Směrnice	Regresní rovnice
0	207.90	207.90		$a_1 = -280.43$	$y = 207,9 - 280,43 \times x$
0,5	68.70	67.68	τ_1	$a_3 = -4.79$	$y = 70,08 - 4,79 \times x$
1	58.60	65.29			
2	64.50	60.49			
3	61.90	55.70			
4	45.90	50.90			
5	46.90	46.11			
6	43.40	41.31			
7	34.10	36.52			

Výsledky experimentu 2 ukazují na to, že malý objem gelové vrstvy má významný vliv na účinnost struktury. Přitom destrukce čedičové vrstvy je také snížena. Při větším objemu také dochází k významnému parnímu efektu, což může na jednu stranu oslabit laserové záření a na druhou se teplota vytvořená vypařováním může mít svůj vliv.

5.4 Experiment 3. Explosivní model s vytvořením "mlhové zábrany".

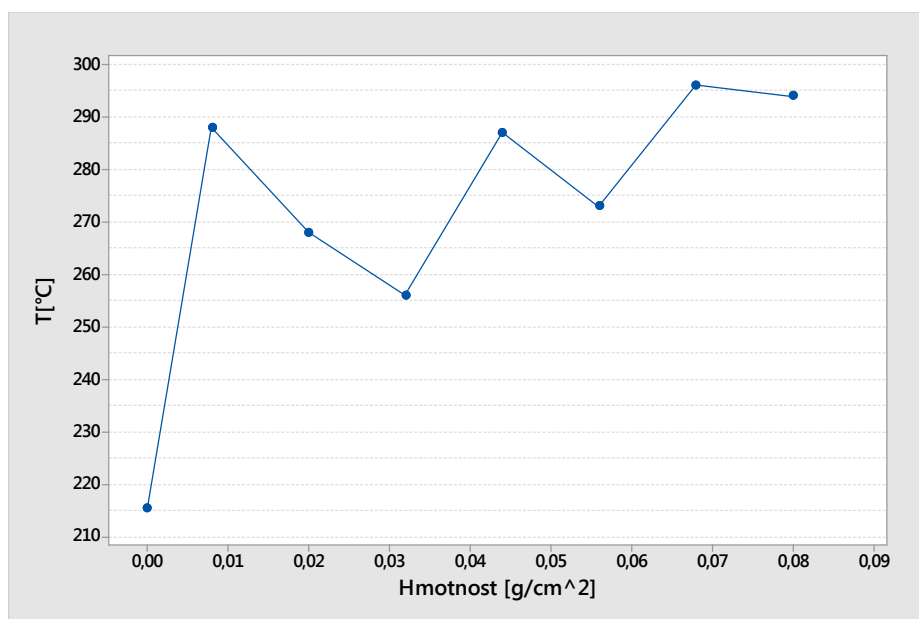
V daném experimentu se zkoušela struktura, která využívala aktivní metody ochrany proti laserovému záření. Způsob spočíval v tom, že povrch vrchní vrstvy byl upraven aktivními látkami. Podle teorií, že laserový paprsek se v nečistém prostředí významně rozptyluje, byly vybrány dvě chemické látky a výbušný prach. Tyto látky se chovají poněkud odlišně při styku s vysokými teplotami. Takže experiment je rozdělen na 3 částí podle využití látky, ale postup zkoušky byl pro všechny stejný. Parametrem sledování vlivu bude hmotnost přidávané látky, který se postupně bude zvyšovat z 0,008 g/cm² do 2 g/cm² s krokem 0,012. Na každou definovanou hmotnost prachu bylo provedeno jenom jedno měření. Efekt vlivu hmotnosti se bude analyzovat pomocí regresní analýzy. Do analýzy výsledků se také zahrne počáteční bod z nultého experimentu.

Část 1. Výbušný prach

Pro zkoušení byl připraven výbušný prach z hlaviček sirek. Vzhledem k povaze použité látky byl experiment dost nebezpečný. Očekávání z dané zkoušky bylo, že výbušný prach dokáže vytvořit dostatečný objem dýmu aby rozptýlil laserové záření. Naměřené hodnoty jsou pak znázorněné v tabulce č. 10.

Tabulka č. 10 Naměřená data experiment 3. Výbušný prach

Hmotnost prachu [g/cm ²]	T[°C]
0	215,4
0,008	288
0,02	268
0,032	256
0,044	287
0,056	273
0,068	296
0,08	294



Obrázek č. 31 Grafické zobrazení experiment 3. Část 1

Takže výbušný prach, který byl použit v této zkoušce neprojevil očekávané výsledky. Naopak došlo ke zvýšení teploty struktury, přitom samotná látka při interakci s laserovým paprskem exploduje rychle a dále paprsek dopadá na vypálenou čedičovou vrstvu. Během exploze se vytvořil dým viz obrázek č. 32, ale nebyl dostatek objemu, aby dokázal rozptýlit laserové záření.



Obrázek č. 32 Explóze výbušné látky

Na obrázku č. 33 je zobrazen efekt explóze na materiálech struktury. Destrukce čediče byla stejná, alobal nebyl nějak strukturně narušen, ale zůstal charakteristický otisk, bavlna začala degradovat.



Čedič



Alobal



Bavlna

Obrázek č. 33 Materiály struktury po zkoušce

Část 2. Chlorid amonný

V této části experimentu se použil chlorid amonný, který na rozdíl od výbušné látky není tak explozivní, ale také může při styku s laserovým paprskem vytvořit "mlhovou zábranu". Jelikož daná látka nevyhoří tak rychle, bude vylučovat plyny po celou dobu interakce a může je vyprodukovat v dostatečném objemu, aby rozptýlily laserové záření. Takže se očekávají lepší výsledky než při použití výbušného prachu.

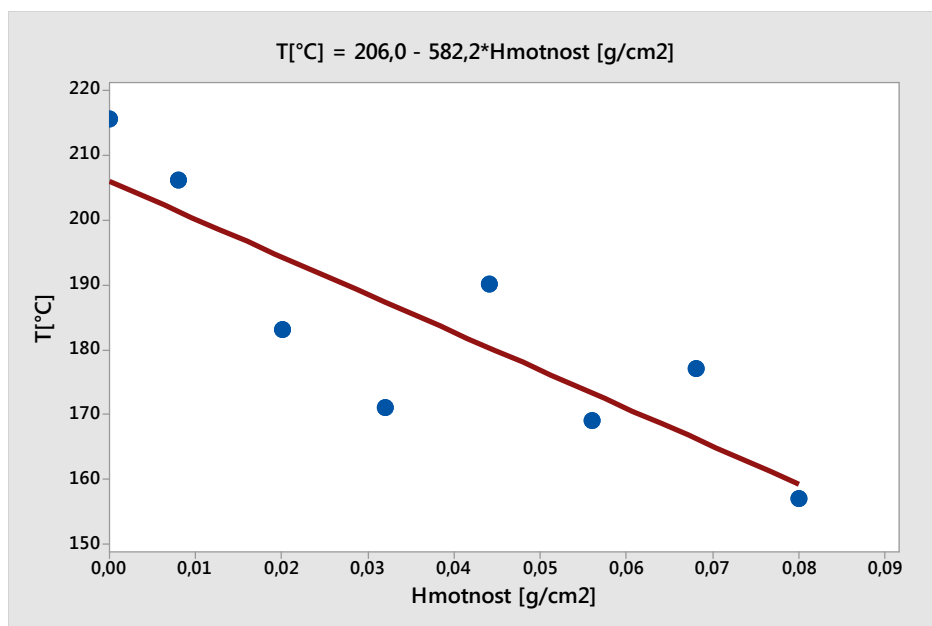
Tabulka č. 11 Naměřené hodnoty experiment 3. Část 2

Hmotnost NH_4Cl [g/cm ²]	T[°C]
0	215,4
0,008	206
0,02	183
0,032	171
0,044	190
0,056	169
0,068	177
0,08	157

Můžeme sledovat lineární trend v datech, takže je zhodnotíme pomocí lineární regrese. Ověříme jestli hmotnost přidávané látky má vliv na účinnost struktury.

Tabulka č. 12 Regresní analýza odhady parametru

Odhady parametru			
Parametr	Odhad parametru	p-hodnota	Závěr
a_0 (T[°C])	206,00	$9,10 \times 10^{-8}$	Významný vliv
a_1 (směrnice)	-582,2	0,0073	Významný vliv
Koeficient determinace R^2	0,725	Model je významný	
Regresní model	$y = 206,00 - 582,2 \times x$		



Obrázek č. 34 Regresní křivka. Experiment 3. Část 2

Regresní model je dostatečně spolehlivý, vysvětluje 72,5% variability dat a faktor hmotnosti má vliv na účinnost struktury. Jako vlastní účinnost struktury s použitím této chemikálie nevykazuje dostatečnou úroveň snížení teploty na rubní straně. Podle výsledku můžeme říct, že "mlhová zábrana" funguje, ale ne dostatečně efektivně rozptyluje laserové záření. Na obrázku č. 35 můžeme pozorovat interakci chloridu amonného s laserovým zářením.



Obrázek č. 35 Mlhová zábrana. Chlorid amonný

Na rozdíl od předchozí zkoušky je destrukce čedičové vrstvy menší, na alobalu také zůstává otisk, bavlna není přitom poškozená obrázek č. 36.



čedič



Alobal

Obrázek č. 36 Stav materiálu po zkoušce

Část 3. Uhličitán amonný

V této části se použila jiná chemikálie, která se liší od ostatních dvou, jak svou konzistencí tak i svými vlastnostmi při interakci s vnějším prostředím. Očekáváme, že látka při styku s laserovým paprskem také vytvoří "mlhovou zábranu", ale na rozdíl od chloridu amonného v obsahu této mlhy nebude velký podíl dýmu, ale bude víc obsahovat amoniak, oxid uhličitý a vodu. Tyto složky jsou právě předpokladem pro to, že daná látka prokáže lepší výsledky ze všech zkoušených.

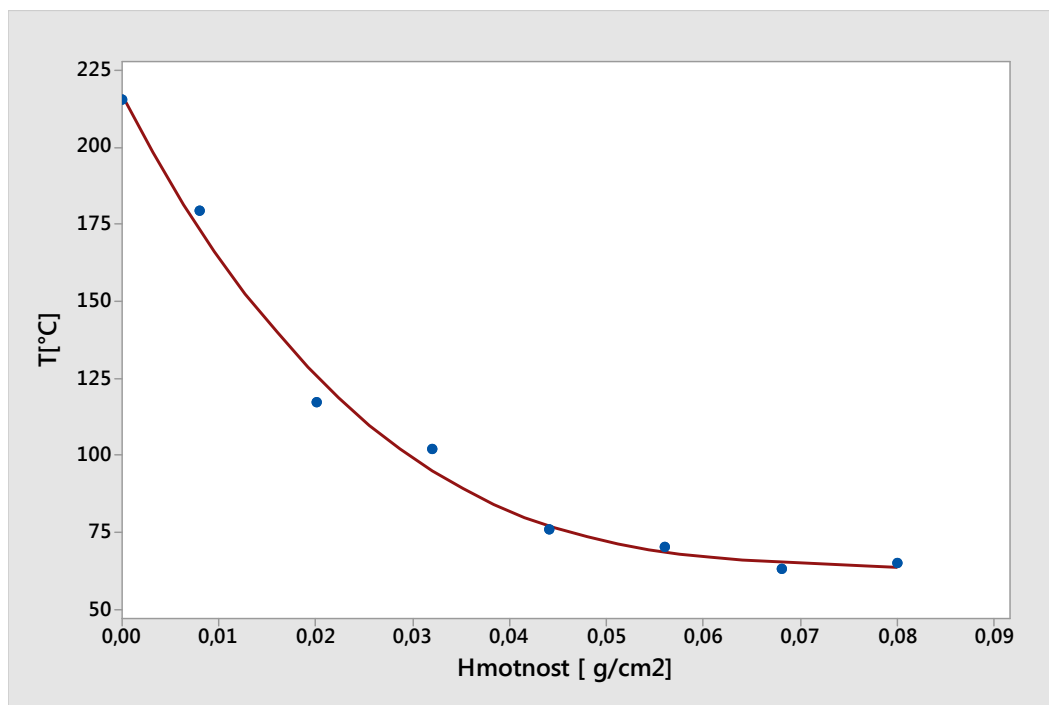
Tabulka č. 13 Naměřená data část 3

Hmotnost(NH ₄) ₂ CO ₃ [g/cm ²]	T[°C]
0	215,4
0,008	179
0,02	117
0,032	102
0,044	76
0,056	70
0,068	63
0,08	65

Zde také bude provedena regresní analýza, aby se odhadnul model, který může popsat přesně závislost mezi hmotnostmi a teplotou. Už z naměřených dat vidíme, že tato kombinace je účinnější než předchozí dvě.

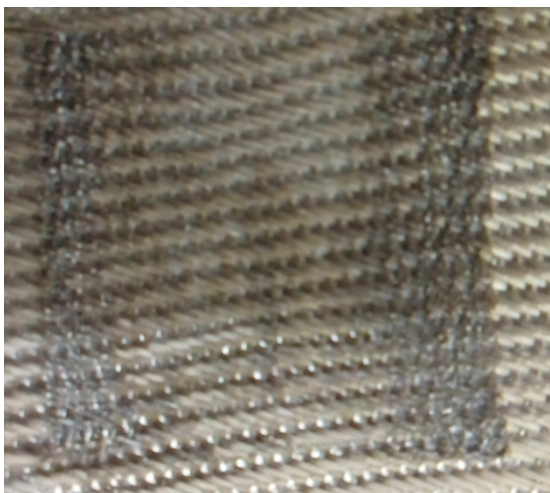
Tabulka č. 14 Regresní analýza část 3

Odhady parametru			
Proměnná	Odhad	p-hodnota	Závěr
a_0	216,7	$5,23 \times 10^{-7}$	Významný vliv
a_1	-5990	0,002	Významný vliv
a_2	80222	0,001	Významný vliv
a_3	365155	0,116	Vliv není významný
Koeficient determinace R^2	0,993	Model je významný	
Regresní model	$y = 216,7 - 5990 \times x + 80222 \times x^2 - 365155 \times x^3$		



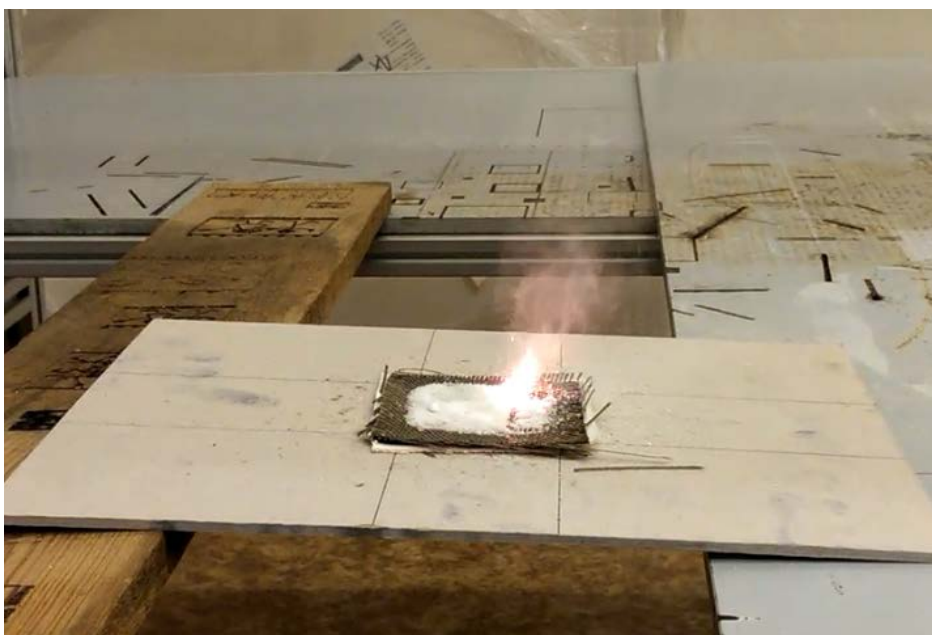
Obrázek č. 37 Regresní model závislosti část 3

Zvolený model je polynom třetího stupně a zcela popisuje závislost mezi dvěma veličinami. Model je spolehlivý a vysvětluje 99,3% variability dat. Už při hmotnostech 0,044 g/cm² teplota rubní strany klesá pod 100 °C, dále to klesá pomaleji a nejnižší naměřená teplota je 63 °C při 0,068 g/cm². Uhličitan amonný mimo to, dokázal snížit destrukce vrchní vrstvy materiálu, čedičová vrstva utrpěla ještě méně poškození než v předchozí zkoušce obrázek č. 38.



Obrázek č. 38 Poškození čedičové vrstvy

Lepší účinnost této látky se vysvětluje obsahem vylučovaného plynu amoniak, oxid uhličitý a voda. "Mlhová zábrana" při tom není moc viditelná na rozdíl od předchozí kombinace obrázek č. 39. Hlavní vadou je amoniak, který není příjemný pro inhalaci.



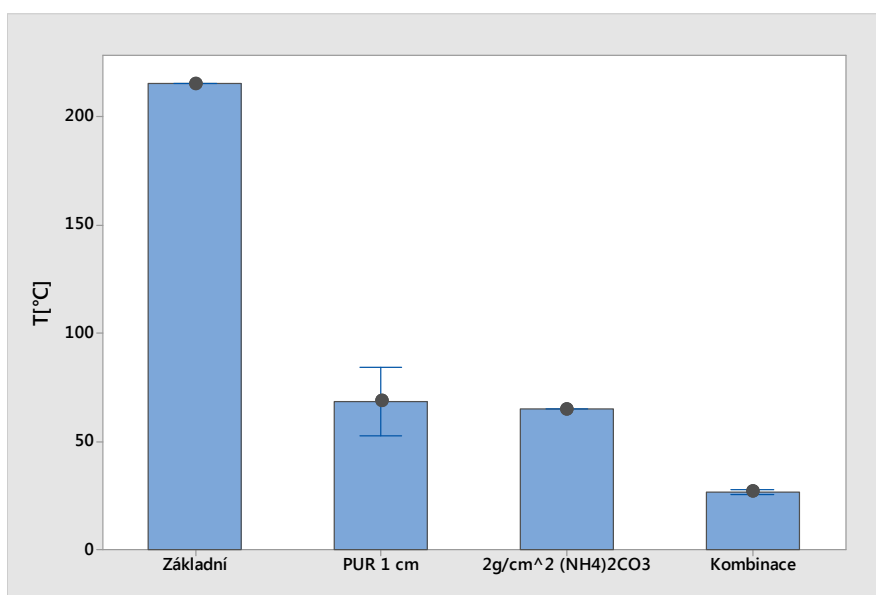
Obrázek č. 39 "Mlhová zábrana". Uhličitán amonný

Část 4. Kombinace struktur

V této části se kombinují dva modely v jeden: model se vzduchovou bariérou a mlhovou zábranou. Jedná se tedy o vložení pěnového materiálu a povrchovou úpravu vrchní vrstvy. Pro zkoušení byla vybrána nejúčinnější látka z předchozích částí uhličitan amonný. Pro kombinací strukturu byla zvolena hmotnost $0,08 \text{ g/cm}^2$, při které teplota dosahovala 65°C . Při použití pěnového materiálu, jako vzduchová bariéra je zvolena polyuretanová pěna o tloušťce 1 cm teplota byla $68,88^\circ\text{C}$. Takže máme ve výsledku kombinovaný model s vloženou pěnovou vrstvou o tloušťce 1 cm a povrchovou úpravou z uhličitanu amonného o hmotností $0,08 \text{ g/cm}^2$. Díky tomu, že uhličitan amonný docela snižuje poškození čedičové vrstvy, pěnový materiál nebude roztaven a zachová svoje izolační vlastnosti. Očekává se významně lepší ukazatel účinnosti dané struktury. Postup zkoušky bude stejný jako v druhé části experimentu 1, výsledky obou zkoušek budou porovnány. V tabulce č. 15 jsou znázorněna naměřená data.

Tabulka č. 15 Naměřená data experimentu 3. Část 4

N	T[°C]
1	26,2
2	28,3
3	25,9
4	27,1
5	27,1
Průměr	26,92
Sm.odch	0,94
Var.koef [%]	3,49
IS 95%	25,75
	-
	28,08



Obrázek č. 40 Porovnání účinnosti s předchozími zkouškami

Výsledky zkoušky prokazují, že účinnost kombinací struktury je skoro maximální. Teplota na rubní straně se zvýšila průměrně o 12%. Struktura ukázala významně lepší výsledky než předchozí zkoušky obrázek č. 40.

5.5 Rekapitulace experimentů

Zde bude uveden souhrn faktorů ovlivňujících účinnost ochrany před laserovým zářením. V každém experimentu byl ověřen vliv hlavního faktoru, ale mimo to lze objevit i další věci, které mohou být brány v úvahu při řešení problému.

Podle vzorce tepelného odporu objevíme dva faktory, které jsou podstatné pro vybudování účinné struktury. Těmito faktory jsou vlastnosti materiálů, jako je tloušťka a tepelná vodivost. Čím větší je tloušťka tím vyšší a nižší tepelná vodivost, tím je vyšší tepelný odpor. Podle toho lze různě kombinovat výběr pro jednotlivé vrstvy. Například použití polyuretanové pěny s dobrými izolačními vlastnostmi, bude splňovat funkce "vzduchové bariéry" líp než při použití v experimentu 2. V případě struktury s gelovou vrstvou hraje roli objem. Malý objem gelové složky významně ovlivňuje účinnost ochrany. Zde se také výběr druhu gelu musí řídit jeho vlastnostmi, jako tepelná vodivost. Povrchová úprava vrchní vrstvy má také významný vliv a to díky tomu, že může zabránit jejímu poškození. Spojením všech těchto faktorů v jedné struktuře lze dosáhnout vysoké úrovně ochrany.

Souhrn hlavních faktorů ovlivňujících účinnost vícevrstevných struktur:

- Tepelná vodivost materiálu
- Tloušťka - celé struktury, "vzduchové bariéry", materiálu
- Objem specifických látek - gel, materiál pro povrchovou úpravu
- Nastavení laserového zařízení
- Doba ozařování

6 Diskuze

V této části dané práce bude provedena diskuze o možnosti uplatnění zkoušených vícevrstvých struktur v praxi. Základní struktura měla jen 3 vrstvy s využitím materiálů vybraných podle předpokladu teoretického modelu. Celkem byly vymyšleny 3 způsoby, neboli struktury chránící před účinkem laserového záření. Všechny struktury měly společný princip rozptylování laserového záření a následného zabránění přenosu tepla, lišily se svou realizací.

Struktura se "vzduchovou bariérou"

Tato struktura je snadno realizovatelná, proto je pravděpodobné uplatnění v průmyslu. Je skoro možné uplatnění této struktury pro vytvoření všech druhů pracovních oděvů. Podle vzoru zimních rukavic se dají navrhnout pracovní rukavice pro laserové svařování, řezání atd. Pracovní bundy můžou být tepelně nekomfortní kvůli vlastnostem alobalu. Na to, že některé materiály ve struktuře snižují tepelný komfort, lze navrhnout pracovní zástěry, které by redukovaly tuto nevýhodu. Také lze použít vhodné konstrukce, jako to nabízí firma JUTEC. Konstrukční řešení spočívá v tom, že přední díly oděvu jsou z ochranného materiálu a zadní díl je z prodyšného.

Na místo pěnového materiálu, který vylučuje toxické látky, lze použít takzvanou distanční pleteninu.



Pracovní plášť



Pracovní bunda



Pracovní rukavice

Obrázek č. 41 Pracovní oděvy firmy JUTEC [8]

Struktura s gelovou vrstvou

V experimentech tato struktura s využitím CMC bavlny, jako gelové vrstvy prokázala významnou účinnost. Přitom aby došlo k význačnému poklesu teploty, bylo potřeba malého objemu přidávané vody. Samotná struktura v tomto provedení je z hlediska technologie těžká pro realizaci. V případě řešení tohoto problému, nastává problém té skutečnosti, že materiál musí přijít do interakce s vodou, aby se vytvořila gelová vrstva. Nejpravděpodobnější varianta je výroba pláště, který se musí před použitím namočit a tím se vytvoří gelová vrstva. Také je problém opakovaného použití, CMC bavlna po několika cyklech začíná ztrácet svoje vlastnosti.

Vhodným materiálem je aerogel, který lze zabudovat do textilní struktury, jako distanční pleteninu a tím vznikne hybridní struktura. V experimentu 3 v čtvrté části bylo prokázáno, že kombinace dvou způsobů vede ke zvýšení účinnosti. V takovém provedení tuto strukturu lze použít pro výrobu všech druhů oděvů, včetně ochranné masky.

Struktura s aktivní ochranou

Daná struktura je navržena zejména pro využití ve vojenském průmyslu. V experimentu bylo prokázáno, že struktura je účinná v podmínkách navrženého experimentu a má dobré chránící vlastnosti. Ale v kombinaci s předchozími strukturami se dosahuje významně lepší účinnosti. Laserové zbraně mají významně větší výkon než laser, který byl použit v experimentu. Proto v daném provedení strukturu nelze použít pro vojenské účely. Přenosné lehké laserové zbraně ještě nejsou tak vyvinuté, jako těžké zbraně. Proto v současné době není potřebná ochranná vesta proti lehčím laserovým zbraním. Opačně je to s těžkými zbraněmi, jako například laserová puška, která na plném výkonu může zničit masivní objekty. V tomto případě lze vyvinout na základě principu "mlhové zábrany" ochranný systém proti působení laserové pušky. Uplatnění této struktury má smysl v průmyslové praxi, ale v kombinaci s předchozími strukturami. Varianta s použitím distanční pleteniny modifikované aerogelem, jako střední vrstvy, zahrnuje princip všech třech struktur: "vzduchová bariéra", gelová vrstva, "mlhová zábrana". Modifikace a vývoj takové struktury má velké perspektivy.

Závěr

Diplomová práce se věnovala problematice ochrany lidského těla před působením záření vysoce výkonných laserů pomocí vícevrstvých struktur. Byly vystudovány metody ochrany proti laserovému záření. Během studia bylo podstatné, že se jedná o složitý jev, kde dochází k působení koncentrované energie na povrch struktury a následný přenos tepla. Řešily se dva problémy, jak rozptýlit laserové záření a zabránit přenosu tepla. Návrh vícevrstvých struktur se řídil těmito úlohami. Následně byly navrženy modely vícevrstvých struktur využívajících různé metody ochrany. Dále tyto modely byly z dostupných materiálů simulovány a vyzkoušeny v experimentu. Vybrané materiály vyhovovaly do jisté míry požadavkům modelu. V experimentální části byla ověřena účinnost každého modelu a sledovaly se parametry, které to ovlivňují. Také byla provedena snaha o optimalizaci těchto parametrů. Ve výsledku se zjistilo, že každá metoda je účinná za podmínek navrženého experimentu. Spojení metod dává nejlepší výsledky a tudíž účinnost. S úpravou a optimalizací vlivných parametrů lze jednotlivé metody a jejich kombinace použít v průmyslové praxi. Metoda aktivní ochrany navržená zejména pro uplatnění ve vojenském průmyslu prokázala, že je perspektivní, ale v daném provedení není použitelná v této oblasti. Samotný nápad by se mohl i nadále rozvíjet a v budoucnu bude aktivní ochrana preferovanější při ochraně proti laserovým zbraním.

Hlavním přínosem této práce je ověření vybraných metod v podmínkách blízkým reálnému nebezpečí. Tyto metody můžou být použity, jako ochrana před působením laserového záření s možností pro další rozvoj. Na základě výstupů této práce se mohou dále navrhovat materiály určené přímo pro vícevrstvé ochranné struktury.

Literatura:

- [1] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J. Fyzika, část 2. VUTIUM Brno a PROMETHEUS Praha, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] KURTUS, Ron. Thermal insulation. KURTUS, Ron. School for Champions [online]. 2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.school-for-champions.com/science/thermal_insulation.htm#.VWV6qdLR81J
- [3] U.S. Department of Energy: Insulation Materials [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://energy.gov/energysaver/articles/insulation-materials>
- [4] LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [5] Futuristic Laser Weapon Ready for Action, US Navy Says. *LiveScience* [online]. Purch, 2014 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/49099-laser-weapon-system-ready.html>
- [6] Laser Bio-effects. *Berkeley Lab* [online]. California: U.S. Department of Energy, 2015 [cit. 2015-12-15]. <Dostupné z: <http://www2.lbl.gov/ehs/safety/lasers/bioeffects.shtml> >
- [7] *Laser Safety Industries* [online]. Minneapolis: Laser Safety Industries, 2016 [cit. 2016-01-7]. Dostupné z: <http://www.lasersafetyindustries.com/default.asp>
- [8] *JUTEC* [online]. OLDENBURG: JUTEC GMBH, 2016 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://www.lasersafetyindustries.com/default.asp>
- [9] KARAŠINSKÁ, Radka a Jakub WIENER. *OCHRANNÉ VLASTNOSTI TEXTILIE VŮČI LASEROVÉMU ZAŘENÍ: PROTECTIVE PROPERTIES OF TEXTILE AGAINST LASER RADIATION*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 83 s., 3 s. příl.
- [10] *Informační Bulletin České statistické společnosti* [online]. , - [cit. 2016-04-28]. ISSN 1210-8022.

[11] Kim H. J. a kol. (2000) Permutation tests for joinpoint regression with applications to cancer rates. Stat. Med. 19, 335 – 351. Correction: Stat. Med. 20, 2001, 655.

[12] Lerman P. M. (1980) Fitting segmented regression models by grid search. Appl. Statist. 29, 77 – 84.

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 Typy interakcí fotonu s atomem nebo molekulou [4]	17
Obrázek č. 2 Porovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru	19
Obrázek č. 3 Schéma pasu svazku s vyznačením poloměru svazku w_0 , jeho divergence Θ a dalších parametrů. [4]	19
Obrázek č. 4 Schéma optického rezonátoru [4]	20
Obrázek č. 5 Laserové vrtání [4]	22
Obrázek č. 6 Laserové řezání [4]	23
Obrázek č. 7 Laserové svařování	23
Obrázek č. 8 U.S Navy laserová zbraň (LaWS) [5]	25
Obrázek č. 9 Hloubka proniknutí laserového záření v závislosti na vlnové délce [6]	26
Obrázek č. 10 Popáleniny laserovým zářením [6]	26
Obrázek č. 11 Ochranné prostředky laserového systému [7]	28
Obrázek č. 12 Nebezpečí při laserovém svařování [8]	28
Obrázek č. 13 Vícevrstvá struktura chráničů před laserovým zářením [8]	29
Obrázek č. 14 Model vícevrstvé struktury se "vzduchovou bariérou"	30
Obrázek č. 15 Model s využitím gelové vrstvy	31
Obrázek č. 16 Model s použitím explodované složky	32
Obrázek č. 17 Grafické znázornění experimentu	33
Obrázek č. 18 Grafické znázornění experimentu	34
Obrázek č. 19 Nultý test. Destrukce čediče	37
Obrázek č. 20 Samostatná bavlna po interakci s laserovým paprskem	37
Obrázek č. 21 Doutnání bavlny	38
Obrázek č. 22 Zhnědnutí bavlny	38
Obrázek č. 23 Ukázka experimentálního vzorku	38
Obrázek č. 24 Vzorek po ozáření a destrukce alobalu	40
Obrázek č. 25 Grafické zobrazení výsledků experimentu 1. Kombinace B	41
Obrázek č. 26 Polyuretanová pěna proti vzduchové mezeře	42
Obrázek č. 27 Experiment 1 část 2. Destrukce čediče a roztavení polyuretanové pěny	43
Obrázek č. 28 Vzorek experiment 2	44
Obrázek č. 29 Destrukce čediče v experimentu 2	45
Obrázek č. 30 Regresní model joinpoint	47
Obrázek č. 31 Grafické zobrazení experiment 3. Část 1	49

Obrázek č. 32	Exploze výbušné látky	50
Obrázek č. 33	Materiály struktury po zkoušce	50
Obrázek č. 34	Regresní křivka. Experiment 3. Část 2	52
Obrázek č. 35	Mlhová zábrana. Chlorid amonný	52
Obrázek č. 36	Stav materiálu po zkoušce	53
Obrázek č. 37	Regresní model závislosti část 3	54
Obrázek č. 38	Poškození čedičové vrstvy	55
Obrázek č. 39	"Mlhová zábrana". Uhličitan amonný	55
Obrázek č. 40	Porovnání účinnosti s předchozími zkouškami	56
Obrázek č. 41	Pracovní oděvy firmy JUTEC [8]	58
Obrázek č. 42	Vzorek A	65
Obrázek č. 43	Vzorek B	66
Obrázek č. 44	Vzorek C	66
Obrázek č. 45	Vzorek D	66
Obrázek č. 46	Vzorek E	67
Obrázek č. 47	Vzorek F	67
Obrázek č. 48	Vzorek G	67
Obrázek č. 49	Graf průběhu teploty. Čedič-alobal-bavlna	68
Obrázek č. 50	Graf průběhu teploty Kombinace B	68
Obrázek č. 51	Graf průběhu teploty. Vliv PUR pěny	69
Obrázek č. 52	Graf průběhu teploty. Gelová vrstva. Objem vody 7 ml/25cm ²	69
Obrázek č. 53	Graf průběhu teploty. Aktivní ochrana. Uhličitan amonný.	70
Obrázek č. 54	Graf průběhu teploty. Aktivní ochrana a polyuretanová pěna	70

Seznam tabulek

Tabulka č. 1	Klasifikace laseru	21
Tabulka č. 2	Výsledky nultého testu	37
Tabulka č. 3	Naměřená data experiment 1	39
Tabulka č. 4	Informace o faktoru	40
Tabulka č. 5	Vystup analýzy rozptylu kombinace A	41
Tabulka č. 6	Výsledky zkoušky druhé části experimentu 1	42
Tabulka č. 7	Naměřená data experiment 2	44
Tabulka č. 8	Odhady regresních parametrů	47
Tabulka č. 9	Teoretické hodnoty a regresní rovnice	48
Tabulka č. 10	Naměřená data experiment 3. Výbušný prach	49
Tabulka č. 11	Naměřené hodnoty experiment 3. Část 2	51
Tabulka č. 12	Regresní analýza odhady parametru	51
Tabulka č. 13	Naměřená data část 3	53
Tabulka č. 14	Regresní analýza část 3	54
Tabulka č. 15	Naměřená data experimentu 3. Část 4	56

Seznam příloh

Příloha 1 Analýza povrchu čedičové vrstvy po ozáření laserem	65
Příloha 2 Grafy průběhu teploty	68

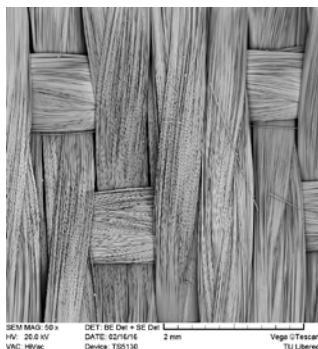
Příloha 1 Analýza povrchu čedičové vrstvy po ozáření laserem

Pomocí rastrovací elektronové mikroskopie, rastrovacího elektronového mikroskopu Tescan VEGA byly hodnoceny povrchy vzorků čedičové vrstvy z různých zkoušek. Protože v některých zkouškách docházelo ke stejné míře poškození, byly vybrány vzorky lišící se mírou své destrukce.

Vybrané vzorky:

- A - neozářený vzorek čedičové vrstvy, obrázek č. 39
- B - nultý test, experiment 1, obrázek č. 40
- C - experiment 2, obrázek č. 41
- D - experiment 3, část 1, obrázek č. 42
- E - experiment 3, část 2, obrázek č. 43
- F - experiment 3, část 3 hmotnost NH_4Cl $0,008\text{g/cm}^2$, obrázek č. 44
- G - experiment 3, část 3 hmotnost NH_4Cl $0,08\text{g/cm}^2$, obrázek č. 45

Při zvětšeném pohledu na vzorky B a D lze pozorovat na tavenině charakteristické póry, které vznikají při dokončeném zesíťování a další roztavení není možné, vzorek se stává křehký. Vzorky B,D,F,G jsou roztavené částečně, tavenina přitom místy tvoří kuličky. Dané vzorky ještě neztratily ohebné vlastnosti.

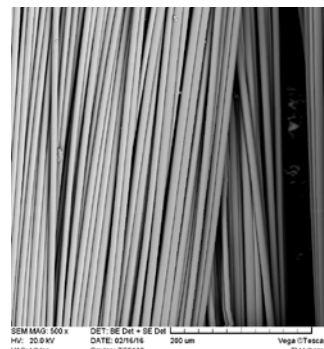


Vzorek A zvětšení 50×

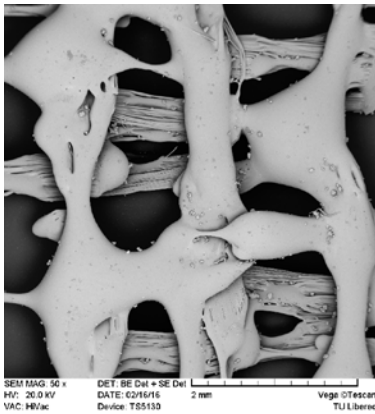
Obrázek č. 42 Vzorek A



Vzorek A zvětšení 100×



Vzorek A zvětšení 500×

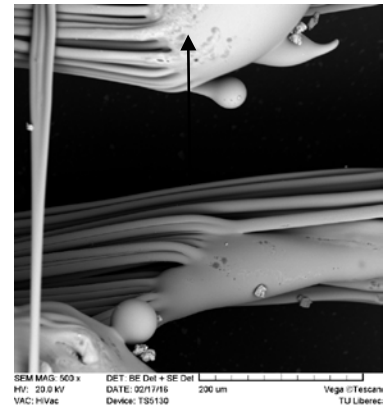


Vzorek B zvětšení 50×

Obrázek č. 43 Vzorek B



Vzorek B zvětšení 100×



Vzorek B zvětšení 500×

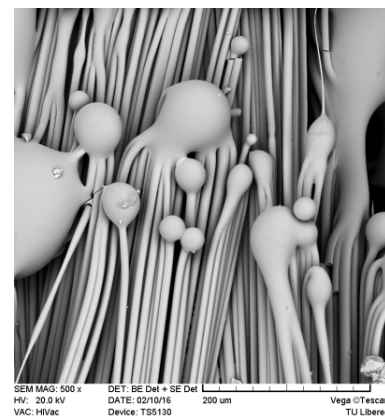


Vzorek C zvětšení 50×

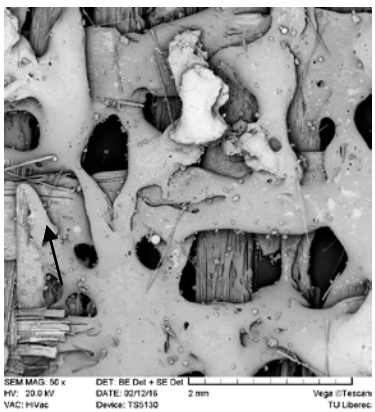
Obrázek č. 44 Vzorek C



Vzorek C zvětšení 100×

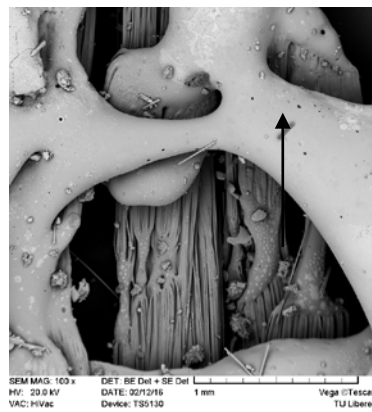


Vzorek C zvětšení 500×

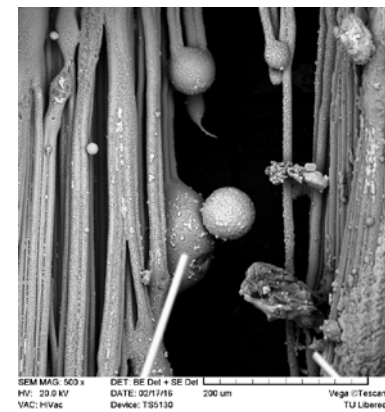


Vzorek D zvětšení 50×

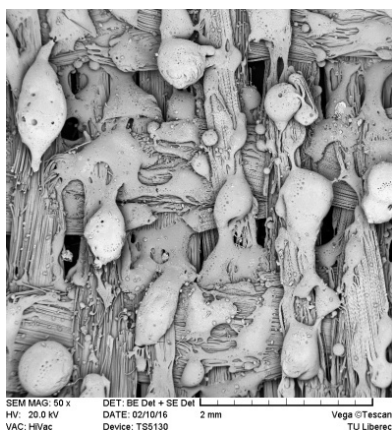
Obrázek č. 45 Vzorek D



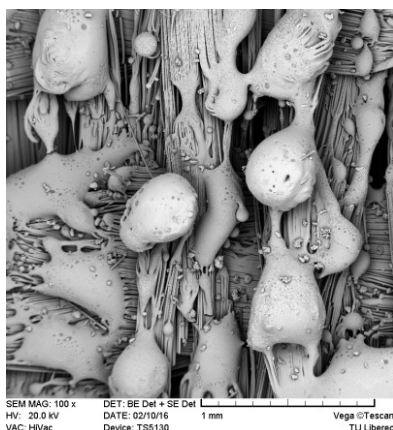
Vzorek D zvětšení 100×



Vzorek D zvětšení 500×



Vzorek E zvětšení 50×

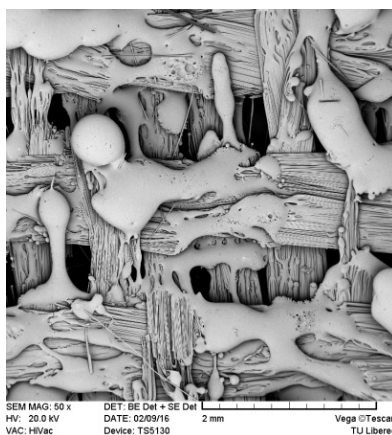


Vzorek E zvětšení 100×



Vzorek E zvětšení 500×

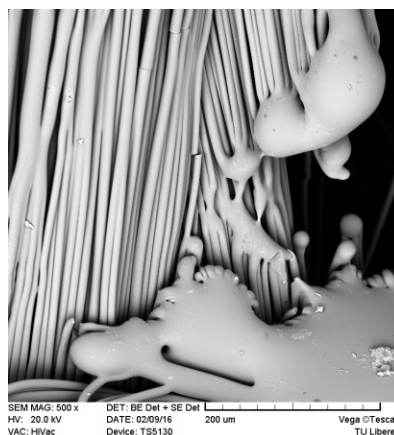
Obrázek č. 46 Vzorek E



Vzorek F zvětšení 50×



Vzorek F zvětšení 100×



Vzorek F zvětšení 500×

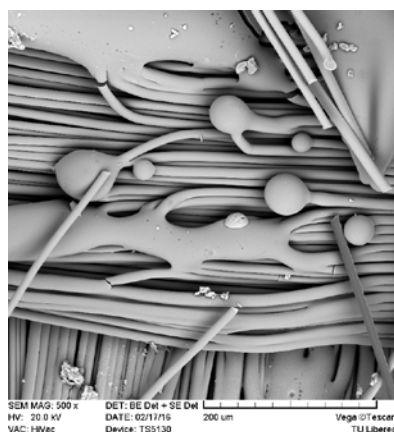
Obrázek č. 47 Vzorek F



Vzorek G zvětšení 50×



Vzorek G zvětšení 100×

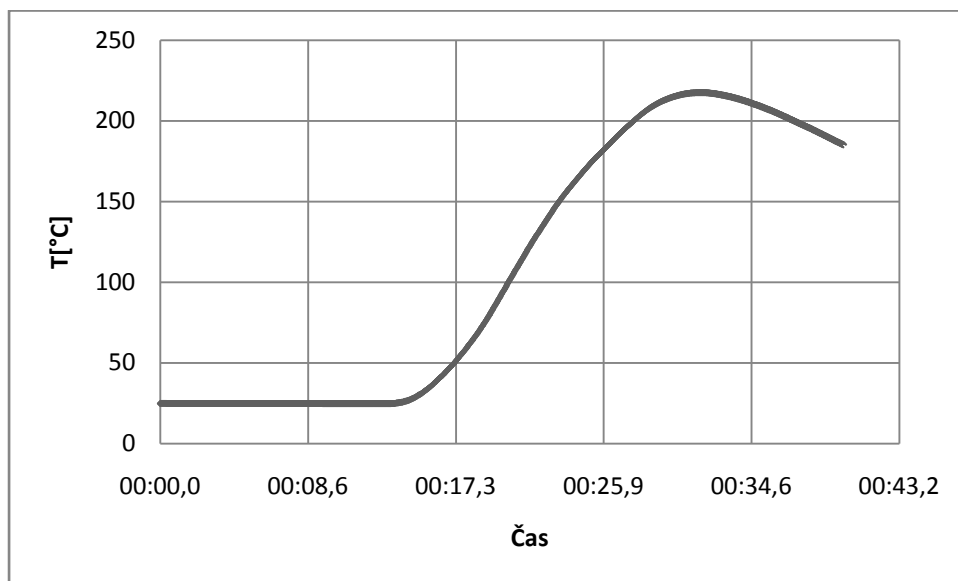


Vzorek G zvětšení 500×

Obrázek č. 48 Vzorek G

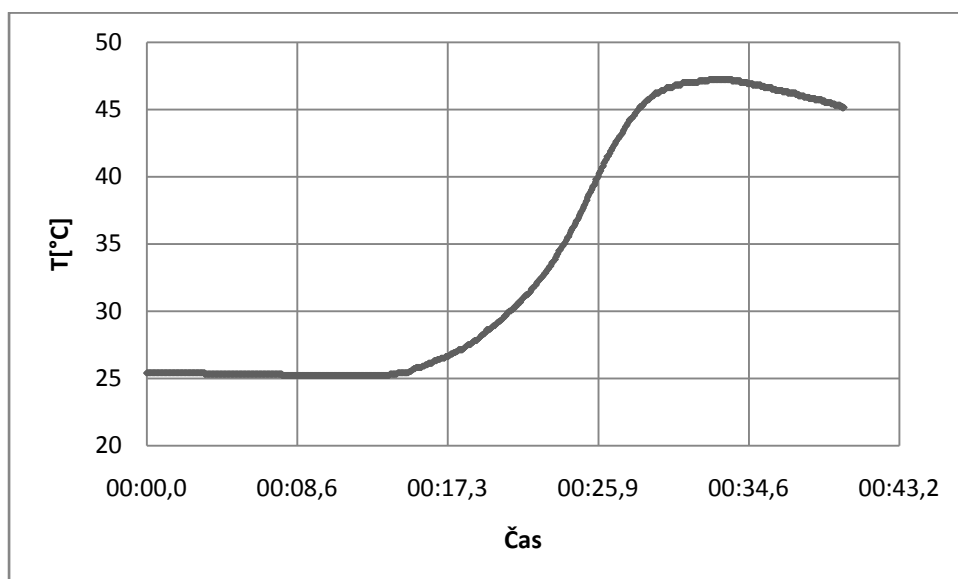
Příloha 2 Grafy průběhu teploty

Nultý experiment. Kombinace čedič-alobal-bavlna



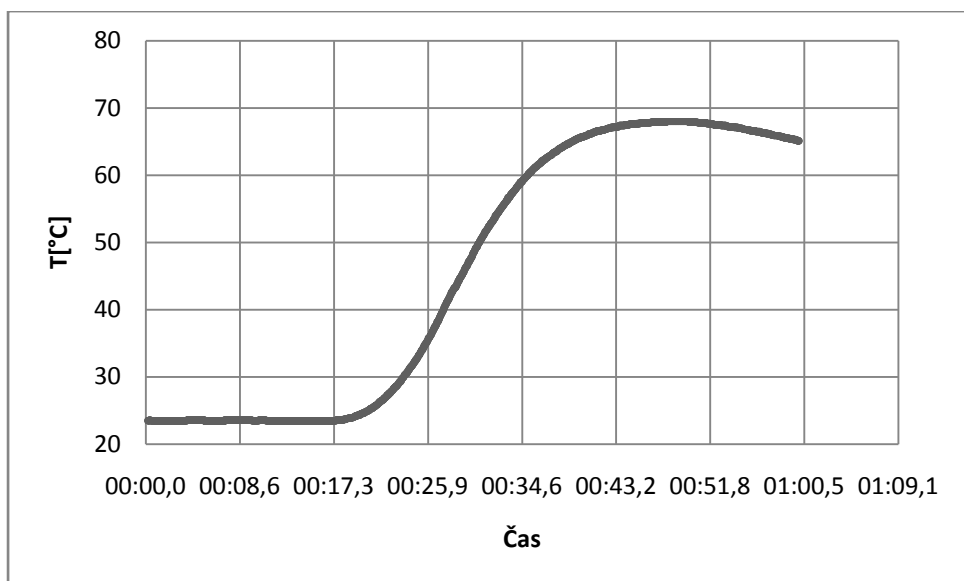
Obrázek č. 49 Graf průběhu teploty. Čedič-alobal-bavlna

Experiment 1. Kombinace B čedič-alobal-vzduchová mezera-bavlna. Tloušťka mezery 10 mm



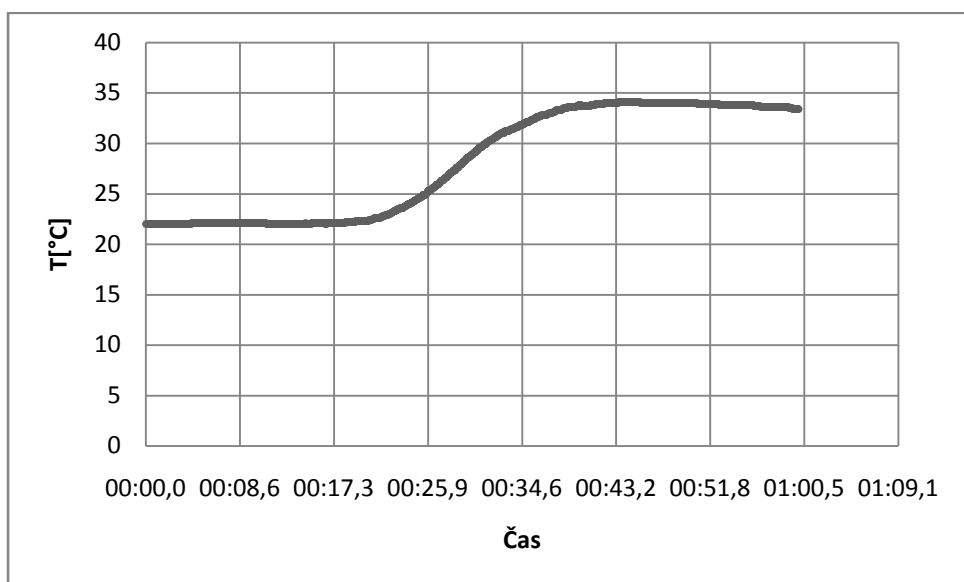
Obrázek č. 50 Graf průběhu teploty Kombinace B

Experiment 1. Část 2. Kombinace čedič-alobal-polyuretanová pěna-bavlna



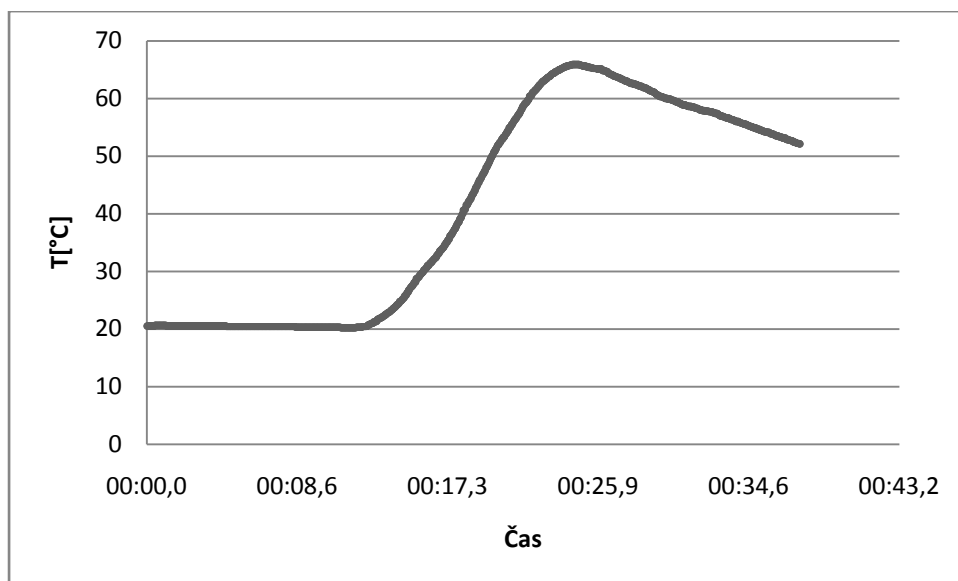
Obrázek č. 51 Graf průběhu teploty. Vliv PUR pěny

Experiment 2. Gelová vrstva



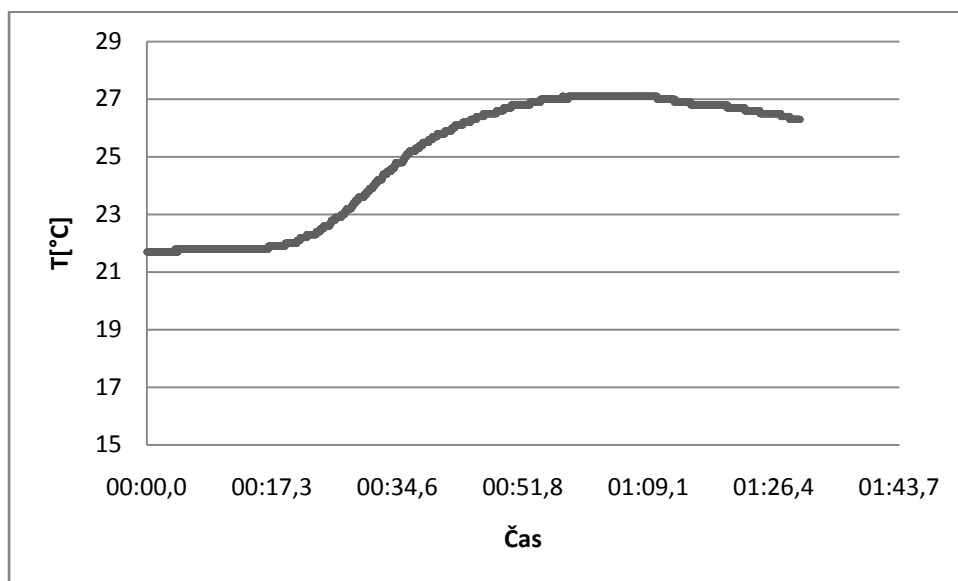
Obrázek č. 52 Graf průběhu teploty. Gelová vrstva. Objem vody 7 ml/25cm²

Experiment 3. Aktivní ochrana - uhličitan amonný, hmotnost $0,08 \text{ g/cm}^2$



Obrázek č. 53 Graf průběhu teploty. Aktivní ochrana. Uhličitan amonný.

Experiment 3. Kombinace vzduchové mezery a aktivní ochrany



Obrázek č. 54 Graf průběhu teploty. Aktivní ochrana a polyuretanová pěna.